

Arquitectura Ecoeficiente

TOMO I

EDITORES
RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN
OLATZ IRULEGI GARMENDIA
MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ–MIRANDA





Arquitectura Ecoeficiente

TOMO I

EDITORES
RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN
OLATZ IRULEGI GARMENDIA
MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ-MIRANDA



SERVICIO EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO | EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEKO ARGITALPEN ZERBITZUA

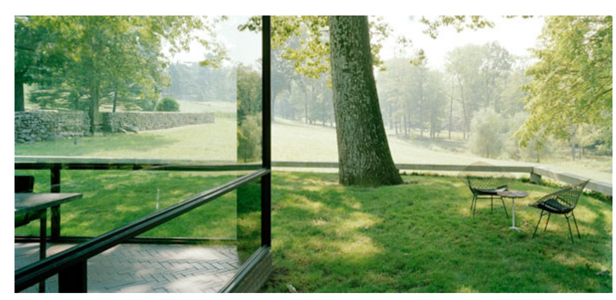


Editores

RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN
OLATZ IRULEGI GARMENDIA
MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ–MIRANDA

Diseño

MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ–MIRANDA



Fotografía en portada de Eirik Johnson

Comité Científico

RUFINO JAVIER HERNÁNDEZ MINGUILLÓN
MATHEOS SANTAMOURIS
EDUARDO DE OLIVEIRA FERNANDES
JOSÉ MARÍA P. SALA LIZARRAGA
LUÍS ALFONSO DEL PORTILLO VALDÉS
ALBERTO ZULUETA GOIENETXEA
FERNANDO BAJO MARTÍNEZ DE MURGUÍA
HELENA GRANADOS MENÉNDEZ
ISABELA VELÁZQUEZ VALORIA
AGUSTÍN HERNÁNDEZ AJA
ÁLVARO SOTO AGUIRRE
VÍCTOR ECHARRI IRIBARREN
SERVANDO ÁLVAREZ DOMÍNGUEZ
RAFAEL SALMERÓN LISSÉN
OLATZ IRULEGI GARMENDIA
MARÍA ARANJUELO FERNÁNDEZ–MIRANDA

Edita

© SERVICIO EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO | EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEKO ARGITALPEN ZERBITZUA

I. S. B. N. 978-84-9860-688-1



ARKITEKTURA SAILA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

Plaza de Oñati 2
20018 San Sebastián
T. + 34 943 018 406
www.masterconstruccionsostenible.org

© Citar como: Hernández_Minguillón, R., Irulegi, O., Aranjuelo_Fernández-Miranda, M. (Eds.). (2012). *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, 338 págs.). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

ARQUITECTURA ECOEFICIENTE TOMO I

2012

Prólogo

El libro que tiene en sus manos responde a la voluntad de los profesores del Máster en Construcción Sostenible y Eficiencia Energética de la Universidad del País Vasco UPV/EHU de ofrecer un conjunto integrado de visiones relativas al estudio, diseño y ejecución de edificios ecoeficientes.

No hemos pretendido crear la falsa impresión de un pensamiento coherente por uniformado; sino poner de manifiesto conjuntamente conocimientos y experiencias adquiridas por cada uno de los autores a lo largo de su vida académica y profesional, que pueden ayudar al lector a profundizar en el ámbito de la arquitectura ecoeficiente.

A la dificultad de asimilación de los profundos cambios exigidos en todos los ámbitos como consecuencia del desarrollo humano: cambio climático, crisis energética, generalización de la movilidad y la migración, globalización cultural, material y tecnológica, comunicación instantánea, etc., se añade una gran confusión en los conceptos y los términos relativos a dichos cambios y en los métodos para utilizarlos con éxito.

Ya han existido en la historia de la humanidad momentos de cambio intensamente convulsos que transformaron la vida y el entorno. Incluso podemos observar como los puntos críticos de esa evolución se corresponden con desequilibrios acumulados a partir de los puntos críticos anteriores. Sin embargo la línea evolutiva no exhibe discontinuidades, sino giros e inflexiones más o menos pronunciados que se inician de forma lenta, casi imperceptible, se aceleran y se complican, para posteriormente volver a suavizarse una vez que se ha consolidado un cauce, que resulte satisfactorio y estable durante un tiempo.

Se acepta de forma general que estamos en uno de esos momentos críticos; pero debemos también entender que nuestro futuro tiene continuidad con nuestro pasado y que nuestras creaciones de mañana evolucionarán a partir de las que hemos realizado recientemente y de las que estamos construyendo. Las cuatro décadas de vida activa de los actores de los cambios aseguran la continuidad del proceso.

El edificio ecoeficiente que construiremos mañana se parecerá mucho al edificio que construimos ayer y es posible que incluso los que construyan en la siguiente generación tampoco resulten radicalmente diferentes; aunque su concepción y tecnología difieran profundamente de los que utilizamos en la actualidad.

Nos atrae lo extraordinario, especialmente cuando aparece ante nosotros como superación de un límite, como sublimación de una idea que actúa como instigadora de cambio y expresión real de su propia posibilidad de existencia; pero justamente la sorpresa que produce el objeto extraordinario reside en la dificultad de crearlos a partir de los medios disponibles, que progresivamente se harán más accesibles y sus resultados ordinarios, porque en otro caso resultarán metabolizados y sus restos aprovechados por órganos diversos.

El edificio ecoeficiente es un estadio más del edificio eficiente, que responde con rapidez o lentitud a cada cambio de paradigma, recicla ideas y materiales, reutiliza el conocimiento y la tecnología acumulados y sobre todo optimiza cada paso para mantener la supervivencia; sin preocupación por las etiquetas, sin nostalgia del pasado; pero sin vértigo por el futuro.

Sólo algunos edificios de los que se muestran como paradigmas del futuro constituirán ejemplos de un cambio que quizá comenzó tiempo atrás y no concluirá pronto, que es reciente, o que deberá esperar para ser creado.

En los capítulos de este libro se citan algunos edificios modélicos y en volúmenes posteriores se ofrecerán ejemplos; pero siempre como muestra de las visiones parciales que deben contribuir a generar el nuevo cuerpo del edificio ecoeficiente.

Puesto que se trata de un volumen con textos de varios autores, discontinuo y diverso, hemos optado por una organización única, clara y fácilmente reconocible. Debemos agradecer a los autores el esfuerzo de ajustarse al protocolo establecido. Consideramos que incluso esta decisión participa del objetivo del libro, que pretende estimular la evolución edificatoria a partir de criterios objetivos, cuantificables, definibles a través de la experimentación y la experiencia.

Transmitimos con este libro el conocimiento de profesionales e investigadores con una amplia trayectoria profesional en Arquitectura ecoeficiente junto con aportaciones de investigadores noveles formados a su vera y pretendemos hacerlo de forma muy sencilla: exposición del material con aplicación práctica; dependiendo del caso: ejercicios matemáticos o físicos, proyectos de arquitectura y proyectos urbanos.

Esperamos que el protocolo utilizado facilite la comprensión, de forma que la lectura resulte cómoda y agradable.

Rufino Javier Hernández Minguillón
Director del Máster en Construcción Sostenible y Eficiencia Energética de la UPV/EHU

Indice


Arquitectura Ecoeficiente


ArquiTecTuRa TOMO I
Ecoeficiente

Listado de Autores

Rufino Javier Hernández Minguillón

EL EDIFICIO ECOEFICIENTE — CAPITULO 1

Rufino Javier Hernández Minguillón es Dr. Arquitecto, profesor titular de Construcción del Departamento de Arquitectura de la Universidad del País Vasco. Investigador en los campos de: construcción ecoeficiente (cerramientos activos sensibles, ambientes inteligentes, industrialización de procesos) y urbanismo ecoeficiente (calidad del ambiente urbano, regeneración urbana, planificación participativa). Responsable del Grupo de Investigación “Calidad de Vida en Arquitectura (CAVIAR)” de la UPV/EHU. Es autor de más de 30 artículos técnicos, 14 libros y monografías y 3 patentes. Ha participado en más de 25 proyectos de investigación nacionales e internacionales.

Es fundador y director del estudio profesional “Alonso, Hernández & asociados” (ah asociados). Ha obtenido más de 80 primeros premios en concursos de arquitectura y urbanismo y obtenido más de 30 premios por las creaciones y actividad profesional. Su obra ha sido publicada en las revistas más prestigiosas.

José Mª P. Sala Lizarraga

TRANSMISION DE CALOR EN EDIFICIOS — CAPITULO 2

José Mª P Sala Lizarraga es Dr. Ingeniero Industrial y Dr. en Ciencias Físicas. Ocupa la Cátedra de Termodinámica y Fisicoquímica de la E.T.S. de Ingeniería de Bilbao (Universidad del País Vasco). Su actividad investigadora se ha desarrollado en el campo de la eficiencia energética de procesos industriales, con aplicación de la termoeconomía y el análisis exergético y en el del modelado y simulación de equipos e instalaciones energéticas. Durante ocho años simultaneó su actividad académica con la de Director Técnico de una empresa de ingeniería dedicada a estudios y proyectos de instalaciones energéticas. Ha escrito seis libros sobre Termodinámica y uno sobre Cogeneración y ha publicado setenta y cinco artículos en revistas nacionales e internacionales, siendo autor de tres patentes de carácter nacional.

Manuel Ruiz de Adana Santiago

FUNDAMENTOS DE VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS — CAPITULO 3

Manuel Ruiz de Adana Santiago es Profesor Titular del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Córdoba. Es Dr. Ingeniero Industrial, con especialidad en eficiencia energética y climatización desde el año 2002 y miembro de ASHRAE. Es Profesor responsable de asignaturas relacionadas con la eficiencia energética y la climatización en distintos Másters y estudios de Postgrado de la Universidad de Córdoba y de la Universidad Internacional de Andalucía. También es responsable de la sección de Ventilación Natural en el Máster de Construcción Sostenible y Eficiencia Energética de la Universidad del País Vasco. Las líneas de investigación activas en las que está trabajando están relacionadas con sistemas de ventilación natural mediante fachadas ventiladas así como con los sistemas de difusión aire y su relación con los problemas de contaminación cruzada entre personas. Actualmente es responsable del Laboratorio de Ventilación y Calidad de Aire Interior, LAVEC, de la Universidad de Córdoba, donde se desarrollan estudios numérico-experimentales relacionados con estas líneas, cuyos resultados han sido publicados en revistas y en congresos internacionales.

Olatz Irulegi I Antonio Serra

HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS CLIMÁTICO Y ESTRATEGIAS DE PROYECTO CAPITULO 4

Olatz Irulegi es Dra. Arquitecta y Profesora de Construcción Industrializada (en Grado) y de Herramientas de análisis bioclimático (en Máster) en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de San Sebastián (Universidad del País Vasco). Su Tesis Doctoral se titula “Eficiencia energética de Fachadas Ventiladas Activas aplicada a edificios de oficinas en España” (2011, EHU/ UPV). Fue becada por el Ministerio de Educación y Ciencia y realizó una estancia en el Group Building Environmental Studies de la Universidad de Atenas (Grecia). Anteriormente cursó un Máster en Diseño Arquitectónico (2007, UNAV), becada por “La Caixa”, y un Máster en Construcción Sostenible y Eficiencia Energética (2009, EHU/ UPV). Entre los proyectos de investigación en los que ha participado se encuentran: Fachadas Ventiladas Activas (Financiado por el Plan Nacional de Investigación) y el proyecto Ekihouse con el que ha participado en la competición Solar Decathlon Europe 2012.

Antonio Serra es Ingeniero Ambiental y Dr. Europeo por la Facultad de Arquitectura de Alghero, Universidad de Sassari, Italia. Su Tesis Doctoral se titula “A decision support tool for preliminary design oriented to sustainability: a relational approach” y ha sido desarrollada entre el Departamento de Arquitectura de Alghero y la Universidad de Atenas, Grecia, Group Building Environmental Studies. Actualmente es Coordinador de Proyectos de Eficiencia Energética en la empresa Alecop y Profesor en el Máster de Construcción Sostenible y Eficiencia Energética de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de San Sebastián (Universidad del País Vasco). Ha trabajado en diferentes grupos y proyectos de investigación nacionales e internacionales (CTO – Campaign for Take Off, ShMILE, etc.) y es autor de publicaciones, artículos y capítulos en libros. Ha participado como consultor de Eficiencia Energética en concursos de arquitectura internacionales.

Ana García-Romero I Gonzalo Diarce

MATERIALES DE CAMBIO DE FASE PARA ALMACENAMIENTO TÉRMICO Y SU EMPLEO EN EDIFICACIÓN CAPITULO 5

Ana García Romero es Licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad del País Vasco (España), Máster en Ingeniería de Materiales Aeroespaciales por la Universidad de Cranfield (Reino Unido) y Dra. en Ciencias por la Universidad Politécnica de Catalunya (España). Su dilatada carrera investigadora ha estado centrada en el área de la Ingeniería de los Materiales. Hasta el año 2006, contratada como investigadora y jefe de proyecto en el centro tecnológico Inasmet (actual Tecnalia), donde su trabajo se centró en el desarrollo y caracterización de los materiales compuestos de matriz metálica. En el año 2006 se incorpora como Profesora al Departamento de Ingeniería Minera y Metalúrgica, y Ciencia de Materiales de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. La incorporación a la Universidad del País Vasco se acompaña de un cambio en el área de investigación, dedicándose desde dicho año al desarrollo de materiales de cambio de fase, y aplicaciones y tecnologías que los contengan.

Gonzalo Diarce es Ingeniero Químico por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao (Universidad del País Vasco UPV/ EHU), y Máster en Investigación en Eficiencia Energética y Sostenibilidad especialidad Edificación por la misma Universidad. Posee experiencia en la industria dentro de los sectores metálico y energético. Desde el año 2010 se encuentra trabajando como personal investigador contratado en la UPV/EHU (ENEDI) en aspectos relacionados con eficiencia energética, más específicamente sobre materiales de cambio de fase (PCMs) y su aplicación en edificación.

José Pablo Calvo Busello

EL VIDRIO EN ARQUITECTURA CAPITULO 6

José Pablo Calvo Busello es Arquitecto en Edificación y en Urbanismo por la Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.A., y Arquitecto Técnico por la EUAT de Madrid. Ha desarrollado su actividad profesional desde 1.973 en la Empresa Privada, dedicado a la Industria de la fabricación y aplicación del vidrio en construcción, en la Dirección de Ingeniería General y en el Centro de Información Técnica de Aplicaciones del Vidrio (CITAV) de CRISTALERÍA ESPAÑOLA, S.A., Su actividad se ha centrado fundamentalmente en la asesoría a profesionales sobre la aplicación del vidrio en sus dos facetas térmica y mecánica para proyectos singulares, aplicaciones y patologías impartiendo habitualmente charlas técnicas sobre el vidrio, su historia, fabricación y aplicaciones en Escuelas Politécnicas públicas y privadas, así como en Colegios Profesionales y Fundaciones, para Cursos de especialización y Máster, y Asociaciones de Fabricantes del Sector para divulgar y orientar sobre materiales vítreos adaptados a criterios de eficiencia energética. También ha colaborado con el Instituto de Cerámica y Vidrio (I.C.V.), del C.S.I.C., en el estudio de patologías de rotura.

Servando Álvarez Domínguez | Rafael Salmerón Lissén

EFICIENCIA ENÉRGETICA EN EDIFICIOS CAPITULO 7

Servando Álvarez Domínguez es Dr. Ingeniero Industrial, Catedrático del Departamento de Ingeniería Energética de la Universidad de Sevilla. Desde el año 1979 su línea principal de investigación ha sido el uso racional de la energía en los edificios, habiéndose especializado en temas de modelización y simulación aplicada al comportamiento térmico de la envuelta de los edificios, de los espacios urbanos y de los sistemas de acondicionamiento. Ha participado en más de 50 proyectos de investigación internacionales relacionados con las líneas anteriores en el marco de la Agencia Internacional de la Energía y de los programas de investigación de la Unión Europea. Ha coordinado los trabajos del grupo de Termotecnia en los proyectos relacionados con el desarrollo del Código Técnico de la Edificación en su vertiente de limitación de la demanda de energía para calefacción y refrigeración, escalas de calificación, métodos prescriptivos de certificación y procedimientos oficiales de certificación energética de edificios existentes Ce3.

Rafael Salmerón Lissén es Dr. Arquitecto en materia de Arquitectura y Medio Ambiente, con Título: “Procedimiento de Diseño de Edificios de Alta Eficiencia Energética para Tipologías Edificatorias Básicas”, dirigida por el Dr. Arquitecto José María Cabeza Laínez (Departamento de Historia, Teoría y Composición Arquitectónica) en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla en 2011. Desde 2007, compagina su propio estudio de arquitectura “SAMLER” con la investigación en eficiencia energética edificatoria en el Departamento de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros, junto a los Catedráticos Servando Álvarez y José Luís Molina, cuyo grupo de investigación es de reconocido prestigio tanto a nivel nacional como internacional. Su estudio de arquitectura se ha destacado por un claro compromiso medioambiental, energético y sostenible, tanto en los proyectos propios como en actividades de consultoría para la optimización y mejora de proyectos externos, desde estudios de arquitectura hasta promotores nacionales implicados en estos aspectos.

Francisco Javier Rey Martínez | Cristina Cano Herrador | Sergio L. González

BOMBAS DE CALOR. UNA TECNOLOGÍA RENOVABLE Y ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE EN EDIFICIOS CAPITULO 8

Francisco Javier Rey Martínez es Catedrático de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid desde el año 1989. Ha ocupado cargos directivos como Director de I+D+i del Centro Tecnológico de la Junta de Castilla y León. Centro de Ahorro y Diversificación Energética CADE entre los años 1993-1997 y Director del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid en el periodo 1999-2003. Actualmente es Director de Área de Calidad ambiental y sostenibilidad de la Universidad de Valladolid (equipo rectoral) desde el 2006. Director del Grupo de investigación reconocido GIR de Termotecnia de la UVA 2005, Director del Grupo de investigación de excelencia de Castilla y León Grupo GR181-2007 y Director del curso de Postgrado Especialista Universitario en Ingeniería de Climatización por la Universidad de Valladolid desde el año 1993, realizando XIX ediciones. Ha publicado más de 160 artículos, guías, libros nacionales e internacionales, destacando los libros *Bombas de calor y energías renovables*. Editorial Thomson 2005. *Calidad de ambiente interiores*. Editorial Thomson 2007. *Recuperadores de energía en climatización DTIE* 8. Editorial Atecyr 1997. *Sistemas de suelo radiantes*. Editorial Atecyr (2008). *Eficiencia energética en edificios. Certificación energética.* Editorial Thomson 2006. Ha recibido tres premios nacionales en el campo de eficiencia energética, energías renovables y medioambiente como son I Premio nacional “Garcia Ocejo” sobre calidad de las instalaciones. Grupo editorial El Instalador 2000. Premio nacional energías renovables Caja España 2006. Premio nacional sobre medio ambiente. Fundación 3M 2007.

Cristina Cano Herrador es Dra. Ingeniera Industrial y Especialista en Ingeniería de Climatización por la Universidad de Valladolid. Actualmente es Profesora Asociada del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid. Pertenece al Grupo de Investigación Reconocido GIR de Termotecnia de la Universidad de Valladolid y trabaja como Técnico en la Oficina Calidad Ambiental CAS de la UVa, desempeñando las tareas de gestión energética de los edificios de la UVA.

Sergio Lorenzo González González es Arquitecto Técnico y Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid. Titulado en Arquitectura Técnica por la Universidad de Salamanca. Finalizó los estudios de Postgrado de Especialista en Ingeniería de Climatización y Máster en Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales, Calidad y Medio Ambiente el año 2010 en la Universidad de Valladolid. En la actualidad realizando la Tesis Doctoral: "Cálculo, dimensionado y caracterización del acondicionamiento térmico de locales utilizando un sistema combinado colectores solares térmicos de aire y recuperación de energía". Técnico especialista de laboratorio- investigación en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid desde 2009 a 2011. Miembro del Grupo de Investigación Reconocido de Termotecnia de la Universidad de Valladolid. Participación en proyecto de investigación sobre "Sistema combinado de climatización de alta eficiencia energética: R.E.S., C.T.S. Y B.C."

Joan-Lluís Zamora i Mestre

MATERIALES EDIFICATORIOS EN UNA CONSTRUCCIÓN INDUSTRIALIZADA ECOLÓGICA CAPITULO 9

Joan-Lluís Zamora i Mestre es Arquitecto por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (1986) y Dr. Arquitecto por la Universidad Politécnica de Cataluña, UPC (1994). Es Profesor Titular de Técnicas de Construcción Interior, de Acústica y de Técnicas de Auscultación del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I (UPC); Investigador en el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITEC) desde su fundación (1981). Ha sido Subdirector Académico y Secretario de la E.T.S. de Arquitectura del Vallés (UPC), Director del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I (UPC), miembro del Consell Social, del Consell de Govern, consejero de Edicions UPC S.L. y Vicepresidente del Consell de Departaments de la UPC. Ha publicado artículos en las revistas "CSTB magazine", "CAU", "Quaderns d'Arquitectura i Urbanisme", "Tectónica", "AB", " Projeckt Revue ", "INDE", "AFL", etc. Ha publicado diversos libros para el ITEC, el Colegio de Arquitectos de Cataluña y el gobierno de la Generalitat de Cataluña. Es miembro de la Plataforma Tecnológica de la Construcción Española, coordinador del Programa de Doctorado "Tecnología en la Arquitectura, la Edificación y el Urbanismo" y Coordinador del grupo de investigación LiTA (Laboratorio de Innovación y Tecnología en la Arquitectura) de la UPC.

José Mª González Barroso

INDUSTRIALIZACIÓN Y SOSTENIBILIDAD EN LA TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA CAPITULO 10

José Mª González Barroso es Dr. Arquitecto. Profesor Titular del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona- E.T.S.A.B., de la Universidad Politécnica de Cataluña-Barcelona Tech. Subdirector de la E.T.S.A.B. Coordinador y Profesor de la asignatura de Construcción 1. Profesor de Técnicas y Sistemas de Construcción Industrializada en el Máster Universitario de Tecnología de la Arquitectura; y de Arquitectura Sostenible en el Máster Universitario de Arquitectura, Energía i Medio Ambiente. Profesor del Aula de Proyecto Fin de Carrera. Investigador en temas de tecnología de la construcción e innovación. Autor de artículos, comunicaciones en congresos y capítulos de libros relacionados con la construcción industrializada y la sostenibilidad ambiental de los materiales, técnicas y sistemas de construcción. Consultor de empresas públicas y privadas del sector. Asesor y consultor de tecnología de proyectos de arquitectura singulares.

Eloy Velasco Gómez I Ana Tejero González I Manuel Andrés Chicote

ENFRIAMIENTO GRATUITO Y RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN INSTALACIONES TODO AIRE CAPITULO 11

Eloy Velasco Gómez es Dr. Ingeniero Industrial desde Abril de 1998. Licenciado en Químicas Especialidad Ingeniería Química desde Marzo de 1988. Postgraduado como Experto en Ingeniería de Climatización en 1996. Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Univesidad de Valladolid desde 1995, donde es responsable del área de Máquinas y Motores Térmicos y coordinador del Máster de Energía: Generación, Gestión y Uso Eficiente. Investigador en múltiples proyectos del Plan Nacional de Investigación, regionales y más de 70 con empresas e instituciones. Director de 7 Tesis Doctorales. Tres sexenios de investigación y tres quinquenios de docencia. 80 publicaciones de libros, capítulos de libro y artículos de carácter nacional e internacional. 19 artículos en revistas con JCR. 70 contribuciones a congresos de carácter nacional e internacional. Más de 80 cursos impartidos con diferentes instituciones. Una patente. Director y tutor de multitud de proyectos fin de carrera y alumnos en prácticas.

Ana Tejero González es Dr. Ingeniero Industrial desde mayo de 2012. Ingeniera Industrial por la Universidad de Valladolid en septiembre de 2008. Postgraduada como Experta en Ingeniería de Climatización en 2009. Profesor Ayudante no Doctor en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Univesidad de Valladolid desde 2011, donde lleva desde el 2009 como personal investigador. Directora de 7 Proyectos Fin de Carrera. 4 publicaciones en revistas internacionales indexadas, 3 de alto índice de impacto; así como otras 2 en revistas internacionales no indexadas con revisión por pares, y 3 nacionales de relevancia entre los profesionales del sector. 11 contribuciones a congresos de carácter internacional y 4 a congresos nacionales, con 11 publicaciones derivadas. Investigadora en 3 proyectos regional, nacional e internacional.

Manuel Andrés Chicote es Ingeniero Industrial desde Abril de 2010. Postgraduado como Experto en Ingeniería de Climatización. Investigador del Área de Termotecnia del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid desde 2011. En formación de Doctorado dentro del Programa FPU (Formación de Profesorado Universitario) del Ministerio de Educación. Participación como investigador en un proyecto CENIT. Varias contribuciones a artículos y congresos nacionales e internacionales. Experiencia profesional en el sector de las energías renovables como

técnico de la Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA) en 2010. Colaborador en la dirección de varios proyectos fin de carrera. Estancia de 6 meses en el Instituto de Energía de la Universidad Técnica de Dresde (Alemania). Estancia de 2 meses como investigador en formación en el Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión (LITEC) del CSIC en Zaragoza.

Salvador Rueda Palenzuela

EL URBANISMO ECOLÓGICO: SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE UN ECOBARRIO EN FIGUERES CAPITULO 12

Es Ecólogo urbano, fundador y Director de la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona en el año 2000. Se ha especializado en el análisis y planificación de sistemas complejos. Ha desarrollado modelos de ocupación y metabolismo urbanos con criterios de sostenibilidad. Ha concebido un nuevo urbanismo: el Urbanismo Ecológico y una nueva célula urbana (la supermanzana) para la planificación del espacio público y la movilidad urbana. Ha creado un nuevo diccionario para leer la ciudad y un instrumento de medida para calcular la complejidad urbana (diversidad de personas jurídicas). Ama la ciudad pero adora caminar por la montaña. Sus mejores proyectos son sus cuatro hijos.

El edificio ecoeficiente

The Ecoefficient building

Rufino Javier Hernández_Minguillón [a] *

[a] *Dr. Arquitecto. Responsable del Grupo de Investigación Calidad de Vida en Arquitectura, CAVIAR. Dpto. de Arquitectura. Universidad del País Vasco*

Resumen

La arquitectura está experimentando una evolución desde postulados consumistas, basados en la identificación de la ciudad a través de hitos reconocibles universalmente, hacia el reconocimiento por alcanzar el mayor grado de calidad de vida mediante estrategias apoyadas en dos factores: la ecoeficiencia en el cumplimiento riguroso de las exigencias edificatorias (de ubicación, climáticas, culturales, de conocimiento, de medios, técnicas y económicas) y la elección de tipologías edificatorias y sistemas constructivos ecocompatibles (urbanización, terreno-cimiento, estructura, cerramiento, delimitación, acondicionamiento ambiental). En este capítulo se exponen los cambios que previsiblemente se darán en los componentes de estos factores para alcanzar el mayor grado de ecoeficiencia. El resultado de la evolución no serán los artefactos propagandísticos que muestran los medios de difusión, sino organismos híbridos de los sistemas que conocemos con otras soluciones que mejorarán algunas de sus prestaciones.

Palabras clave: Arquitectura Sostenible, Edificación Ecoeficiente, Construcción Sostenible, Hibridación Constructiva, Sistema Ecocompatible, Urbanismo Sostenible

Abstract

Architecture is undergoing an evolution from consumerist assumptions based on the identification of the city through universally recognizable milestones, towards achieving recognition by the highest degree of quality of life. To obtain this objective, it uses strategies that are supported on two factors: the eco-efficiency in strict compliance with edificatory requirements (location, climate, culture, knowledge, media, technical and economic) and the choice of eco-friendly building types and systems (urbanization, soil-foundation, structure, enclosure, delineation, environmental conditioning). This chapter outlines the expected changes that will occur in the components of these factors to achieve the highest degree of eco-efficiency. Results of evolution are not artefacts that propaganda media show, but hybrid organisms of known systems with other solutions that will improve their behaviour.

Keywords: Sustainable Architecture, Eco-efficient Building, Sustainable Construction, Constructive Hybridization, Eco-friendly System, Sustainable Urban Design

1. Introducción. Hacia la arquitectura ecoeficiente

Global

En el último decenio la sociedad se ha dado de bruces con la globalización. Los primeros síntomas fueron las manifestaciones de los agricultores europeos en contra de las medidas de liberalización del comercio mundial de productos agrícolas, después fueron las deslocalizaciones de empresas y factorías y en los últimos tiempos la crisis de materias primas y el colapso financiero.

Sin embargo, estos hechos constituyen sólo picos emergentes de un fenómeno complejo que relaciona la actividad y la cultura de los pueblos.

Estamos en los prolegómenos de una sociedad global que modificará profundamente los comportamientos sociales, las organizaciones políticas y los estatus de los ciudadanos, que tendrán una capacidad de acceso al conocimiento dependiente tan solo de su vinculación a la red de conocimiento global.

¿Cómo responderá la edificación a la sociedad global?

* rufinojavier.hernandez@ehu.es

Citar como: Hernández_Minguillón, R. (2012). El edificio ecoeficiente. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.) *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 1 – 32). San Sebastián, España. Editorial de la UPV/ EHU

Social

Es pronto todavía para vislumbrar las nuevas direcciones; en cualquier caso la edificación del futuro próximo responderá en gran medida a factores de carácter global... que se añadirán al acerbo cultural heredado.

Aun entendiendo que exista una preocupación global por los efectos ambientales de la actividad humana y que existe un grupo de países, en su mayor parte desarrollados, que capitanean una cruzada por la conservación ambiental, ninguna sociedad pone en peligro su estatus socio económico, la satisfacción de las exigencias básicas ya señaladas para responder a un reto estratégico que exige la corresponsabilidad global, por lo que el cambio será lento y poco perceptible.

La sociedad está cambiando hacia funcionamientos más ecológicos dentro de un cauce amplio, lleno de obstáculos que deben ser salvados. Es importante mantenerse dentro de ese cauce, por los canales más amplios y limpios, porque el cauce se estrechará, la corriente aumentará y cabe el peligro de quedar varado o confundir el camino y tener que desandar lo andado [9]. Véase Fig. 1.

En los últimos años la actividad edificatoria en España ha sido febril, pero los nuevos edificios responden a las exigencias de una sociedad que desaparece. Han primado los criterios económicos coyunturales y el futuro pasará factura (energética y ecoeficiente).

Mestiza

Las obras programáticas de la nueva arquitectura ecológica, materializaciones simbólicas más que ofertas ejemplarizantes, pueden servir de estímulo de cambio; pero pronto se mostrarán como torpes balbuceos de una nueva era arquitectónica cuyas características, todavía en esbozo, deben corresponder a la relación: humano - ambiente - conocimiento - tecnología [8].

No es probable que la nueva arquitectura adopte formas distantes respecto a la diversidad imperante, aunque es probable que algunos tipos resulten relegados por su ineficiencia. No existen nuevos materiales capaces de revoluciones constructivas ni agentes extrínsecos tan radicales como para producir mutaciones morfológicas profundas.

Tampoco la ficción científica ofrece modelos adecuados. Lo cotidiano carece de atractivo, se recurre siempre a imágenes insólitas: futuros arcaizantes imposibles, estructuras orgánicas autogeneradas, ciudades ingrávidas, sistemas nanoestructurales regenerativos,... nunca espacios con una virtualidad probable.

La arquitectura respuesta será una arquitectura mestiza, híbrida de tecnologías consolidadas por las mutaciones surgidas de ellas mismas en su proceso de adaptación al nuevo ecosistema gobernado por el ambiente, el conocimiento y la eficiencia.

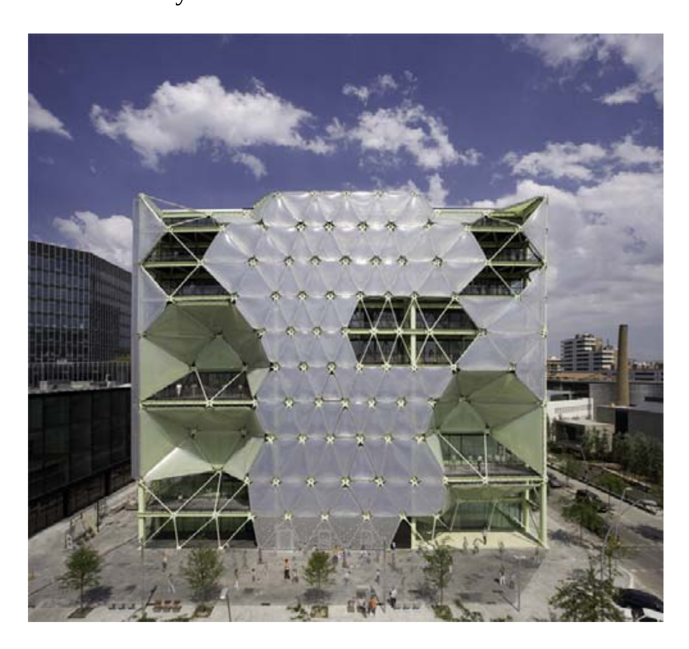


Fig. 2. Los albores de los cambios siempre alumbran propuestas cargadas de formalismo distantes de las correspondientes a las ideas que pretenden expresar.

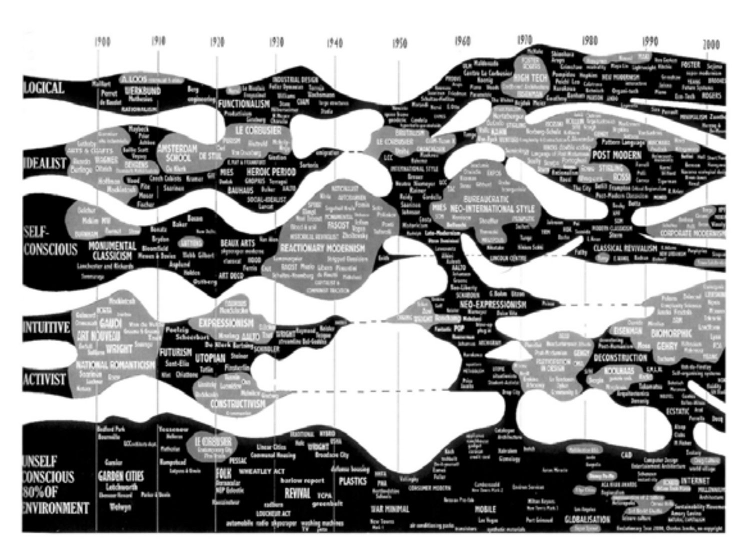


Fig. 1. Cuantos más cauces se vinculen al objeto de la ecoeficiencia más rápida y amplia será la migración de la arquitectura hacia la sostenibilidad. JENCKS, C. Arquitectura 2000. Cauces ideológicos de la arquitectura moderna.



Fig. 3. La hibridación de conocimientos y tecnologías es la vía habitual de cambio en la actividad edificatoria y lo será hacia la ecoeficiencia. Edificios híbridos en la rehabilitación del casco antiguo de Berlín.

2. Arquitectura pasiva o sostenible / lujo o necesidad

2.1. Sostenibilidad y ecología

"Sostenible", término vivo cuyo significado evoluciona con cada edición de los diccionarios se ha convertido en adjetivo necesario en toda actividad que pretende alcanzar el final del siglo comenzado.

¿Qué es arquitectura sostenible?

Se calificaba una actividad como sostenible cuando era capaz de mantenerse sin caer o haciéndolo lentamente. Por lo tanto arquitectura sostenible sería aquella cuyas características y principios pueden perdurar en el tiempo.

Las acepciones últimas[1] incluyen "que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente". El término sostenible implica equilibrio con el entorno.

No se trata de un equilibrio físico o energético global, aunque lo sea en algunos ámbitos concretos. Se trata de un equilibrio ecológico, que implica la voluntad de los intervinientes de economizar afecciones y realizar acciones que restituyan el sistema ambiental.

El término ecológico se me antoja por ello más adecuado que el de sostenible, a pesar del estigma que puede suponer la identificación con actitudes radicales que preconizan el inmovilismo ecológico y son incapaces de observar la imposibilidad de conseguir equilibrios estáticos, incluso en ambientes reducidos, en un sistema social globalizado, afectado por las exigencias de consumo inherentes al proceso evolutivo humano.

Una actitud ecológica se corresponde por tanto con un consumo regido por un comportamiento global que restituya el equilibrio ecológico. Pretender que el consumo, el comercio, o cualquier actividad humana que utilice materias o elementos extraídos del medio ambiente sean "per se" factores antiecológicos implica atribuir a la evolución humana y no a su actitud la responsabilidad del desequilibrio ecológico, posición catastrofista irrazonable.
Una actitud ecológica debe en cambio preconizar formas de desarrollar estas actividades dentro de un ciclo global cerrado.



Fig. 4. La reforestación permite restaurar el hábitat y generar un desarrollo socioeconómico en las zonas donde se practica. Los cultivos de bosques producen madera certificada y el CO_2 absorbido por los árboles durante su crecimiento puede ser vendido como cuotas equivalentes de CO_2.

2.2. Arquitectura pasiva

"Pasivo", es el que recibe sin dar, el que no coopera, el que deja obrar a los demás sin hacer por sí mismo cosa alguna. "Pasivo" es un término negativo y falso, extraño a los conceptos de sistema y de equilibrio.

Acción implica reacción. No existen en sentido estricto sistemas, arquitecturas pasivas. Existen arquitecturas dinámicas y estáticas, como grávidas y ligeras, cerradas y abiertas, sencillas y complejas, rigurosas y gratuitas (arbitrarias), o caras y baratas; pero no pasivas.

El término pasivo parece responder a la sensación que generan las reacciones espontáneas consecuentes a alterar el equilibrio precedente, cuyo resultado, próximo o distante del precedente corresponde a las características físicas, materiales, de los elementos intervinientes, especialmente a

[1] RAE, Diccionario de la Real Academia, avance de la vigésima tercera edición.

sus propiedades elásticas y a la intensidad y características de las acciones involucradas.

En la naturaleza existe cierta relación entre la velocidad y el carácter de las acciones y reacciones. Una variación rápida y drástica del clima conduce a una modificación similar del biotopo afectado, significando en algunos casos la destrucción parcial o total de sus integrantes, mientras que una modificación lenta produce su evolución, adaptación, migración.

En la naturaleza el tiempo físico, aséptico, es una dimensión ineficaz ya que las mutaciones no se corresponden con un único estímulo. Para el ser humano el tiempo es un factor determinante. El equilibrio buscado se pretende instantáneo o según un patrón ajeno a los factores que han actuado para alterar el equilibrio precedente.

En la naturaleza las acciones intensas y rápidas alcanzan el equilibrio mediante destrucción, irreversible en el corto plazo; pero acciones aparentemente inocuas pueden dar lugar a alteraciones profundas distantes en el tiempo y en el espacio. La actividad humana pretende habitualmente alcanzar con rapidez nuevos estados de equilibrio de carácter reversible, elásticos, sin percatarse de la dificultad de concebir sistemas aislados de la naturaleza.

Ante cualquier acción la naturaleza alcanza siempre un nuevo estado de equilibrio, si bien ese equilibrio puede dar lugar a un cambio profundo de los ecosistemas, a la transformación total, "destrucción" de los ecosistemas. El ser humano es un transformador de ecosistemas. La dificultad para determinar todas las consecuencias de sus acciones[2] es un obstáculo para mantener el equilibrio existente de los ecosistemas y por tanto, para garantizar su sostenibilidad.

La actitud ecológica se corresponde con la preservación de los sistemas por sus valores intrínsecos, intentando evitar alteraciones cuyas consecuencias no son completamente determinables.

La actitud sostenible pretende mantener la capacidad de los ecosistemas de atender de forma perdurable las necesidades de los seres humanos; pero no excluye alteraciones acordes con dicha voluntad.

En los últimos tiempos, impulsados por las crecientes capacidades informáticas se han desarrollado programas que pretenden determinar el efecto de las actuaciones, naturales o humanas sobre los sistemas ambientales.

Nuestra limitada capacidad de análisis nos lleva a reducir y discretizar los ámbitos de estudio; pero no debemos dejarnos engañar por opiniones insuficientemente contrastadas y descontextualizadas. La certeza del resultado es mayor cuanto más amplio es el campo de análisis de la afección.

La arquitectura no es pasiva ni activa; pero sí lo son las actitudes de sus autores y moradores, por lo que el término "pasiva" evoca una preferencia por la imitación de tipos constructivos que han albergado las actividades humanas durante milenios.

[2] *"el aleteo de las alas de una mariposa puede provocar un Tsunami al otro lado del mundo"* proverbio chino.

Todavía en la actualidad los tipos edificatorios antiguos resultan apropiados en buena parte de las sociedades rurales, especialmente en las no desarrolladas; pero se muestran ineficientes e insostenibles ante los retos demográficos urbanos de nuestra era.



Fig. 5. Casa tradicional de las Islas Feroé. Construcción de madera alquitranada, zócalo de piedra de basalto y cubierta con vegetación abundante. Además de la protección contra el viento y la tormenta, la orientación sur/suroeste es fundamental para el aprovechamiento de la radiación solar. Arquitectura Solar, Ed. Birkhäuser, 2003.

2.3. Equilibrio

Una actitud ecológica debe corresponderse por tanto con un consumo regido por un comportamiento global que restituya el equilibrio ecológico

Todos los seres de la naturaleza utilizan los medios disponibles hasta el límite de sus posibilidades sin preocupación por el grado de afección que sus acciones producen en el medio.

Durante miles de años unas especies han sustituido a otras alcanzando nuevos equilibrios en los ecosistemas y no hay duda de que su propio desarrollo ha influido en su desaparición o mutación.

Ninguna parte de la naturaleza es ajena a la influencia del ser humano, aun cuando existan áreas terrestres nunca hoyadas por él. El ecosistema terrestre es hoy un ámbito determinado por la actividad humana, profundamente transformado por la especie humana, que en pocos milenios ha alterado totalmente el equilibrio ambiental precedente con objeto de aumentar su capacidad de desarrollo, hasta el punto de que el equilibrio dinámico ambiental del ecosistema terrestre es cada vez menos favorable al desarrollo de la propia especie humana.



Fig. 6. La utilización de la energía fósil ha permitido a la especie humana una transformación total de los ecosistemas, cuya sobreexplotación no compensa la inversión energética empleada, no es sostenible. Paisaje rural de la meseta de Castilla.

El ser humano es el único experimento de la naturaleza que ha llegado a ser consciente de su propia influencia respecto al futuro de su especie y ningún otro ser terrestre, desde los que transmutaron la atmósfera en una capa oxigenada, ha alcanzado una capacidad tan grande de alteración del ecosistema terrestre ambiental.

La preocupación ambiental no es nueva. Desde tiempos antiguos el ser humano ha pretendido corregir los desequilibrios que su forma de vida ha producido en su entorno. Ha respondido con la higiene, con el entubado de aguas residuales a la proliferación de enfermedades epidémicas y con la medicina y los fármacos ha conseguido prolongar la vida por encima de las expectativas de la especie. El ámbito de respuesta a esta preocupación ha estado en todo momento relacionado con la capacidad tecnológica y con la extensión de la sociedad que la impulsaba.



Fig. 7. Los residuos vertidos a ríos y océanos pueden afectar a lugares tan remotos como Groenlandia. Agencia Ambiental Europea.

Hace algunas décadas los humanos comenzaron a percatarse de que era necesario evitar la degradación del medio habitado y se comenzaron a depurar los residuos que se vertían al aire, a los cauces fluviales y al terreno, y más recientemente se ha alcanzado cierta conciencia global sobre las consecuencias de las afecciones de los vertidos producidos por la actividad humana que, aunque no sean directamente nocivos, están provocando alteraciones climáticas que amenazan seriamente el equilibrio medioambiental y conducen inexorablemente a un ecosistema inhóspito para el homo sapiens.

2.4. Arquitectura respuesta

La constatación de que la arquitectura en que vivimos, su construcción, las técnicas utilizadas, no se corresponden con las exigencias de equilibrio ambiental ha llevado durante las últimas décadas a debatir sobre las características que debe tener la arquitectura para poder ser considerada ecológica y sostenible.

Miles de páginas impresas y virtuales recogen la producción, prolija en imágenes, conceptos, obsesiones, ideología,... y consumismo.

Sin duda la necesidad de producir un cierto grado de rebelión en la sociedad exige imágenes rompedoras, identificables con una nueva actitud.

La bandera del nuevo orden debe ser nueva, limpia y brillante, no sirven los viejos vestidos ni los viejos ídolos. La actitud de sus sacerdotes tiene que expresar nuevos grados y nuevas formas de vehemencia... y es necesario contar con un soporte económico suficiente. Un apoyo que no es casi nunca desinteresado y que es movilizado por agentes especializados en hacer de la praxis el camino de cualquier evolución.

Hemos expresado ya anteriormente que la arquitectura respuesta será una arquitectura mestiza, híbrida. Las obras programáticas de la nueva arquitectura sostenible, materializaciones simbólicas más que ofertas ejemplarizantes, pueden servir de estímulo de cambio, pero pronto se mostrarán como torpes balbuceos de una nueva era arquitectónica cuyas características, todavía en esbozo, deben corresponder a la relación **actividad humana – tecnología constructiva – medio ambiente**

No es probable que la nueva arquitectura adopte formas distantes respecto a la diversidad imperante, aunque es probable que algunos tipos resulten relegados por su más que patente ineficacia. No existen nuevos materiales capaces de revoluciones constructivas, ni agentes extrínsecos tan radicales como para producir mutaciones morfológicas profundas.

Tampoco la ficción científica ofrece modelos adecuados[3]. Lo cotidiano carece de atractivo, se recurre

[3] ¿Cómo será la ciudad del futuro? “Si quieres saber la verdad, bastante parecida a como es ahora”. “Cuanto más tecnológicamente avanzada sea una ciudad, menos se parecerá a Blade Runner. La tecnología tiende a ser ubicua y no intrusiva. Los grandes cambios que están por venir no los veremos. Así que la ciudad del futuro es esta misma”. *Respuesta de W. Mitchell, exdecano de arquitectura del MIT a la pregunta de Steven Spielberg en relación con la producción de Minority Report.*

siempre a imágenes insólitas: futuros arcaizantes imposibles, estructuras orgánicas autogeneradas, ciudades ingrávidas, sistemas nanoestructurados regenerativos... nunca espacios con una virtualidad probable.

La arquitectura futura debe seguir las pautas ineludibles de la evolución: ser eficiente. Si además pretende realizarse en un ecosistema urbano (o rural) reconocible a través de su evolución temporal, debe ser ecoeficiente.



Fig. 8. La nueva arquitectura no será muy diferente a la que conocemos. Difícilmente se parecerá a las ciudades que impregnan la cinematografía de ficción. Fotograma de la película Blade Runner. Ridley Scott, 1982.

2.5. Cómo debe ser el edificio ecoeficiente[4]

Es muy habitual en foros amplios de contenido generalista la reiteración en los participantes de conceptos, imágenes y ejemplos extraídos a través de intérpretes diversos de las no demasiadas fuentes primeras de conocimiento, en general lejanas, a veces antiguas y en las nuevas, de calidad no fácilmente contrastable.[5]

Entiendo por tanto interesante realizar un recorrido rápido por el organismo arquitectónico, analizando los orígenes y la dirección de las mutaciones previsibles.

3. Factores determinantes de la arquitectura ecológica

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación de las intervenciones

La preocupación ecológica abarca todos los ámbitos territoriales; aunque existe una preocupación especial por los entornos rurales y una amplia tolerancia en las actuaciones urbanas, en las que prima fundamentalmente la preocupación cosmética.

Si bien para determinar el grado de afección de una actuación es relevante la sensibilidad del ecosistema, también lo son la intensidad de la acción y su dimensión. Estamos acostumbrados a emplear ríos de tinta en discusiones sobre acciones llamativas puntuales, ecológicamente irrelevantes, mientras en las proximidades se alteran de forma irreversible grandes áreas sin apenas discusión.

• *La población humana tiende a localizarse en las ciudades*

En el ámbito rural la diversidad de las actividades disminuye por la dificultad de aumentar su clientela potencial: existe menor oferta de trabajo y existe un diferencial creciente de servicios a favor de las ciudades. La consecuencia es el despoblamiento, o al menos la reducción demográfica de habitantes residentes.

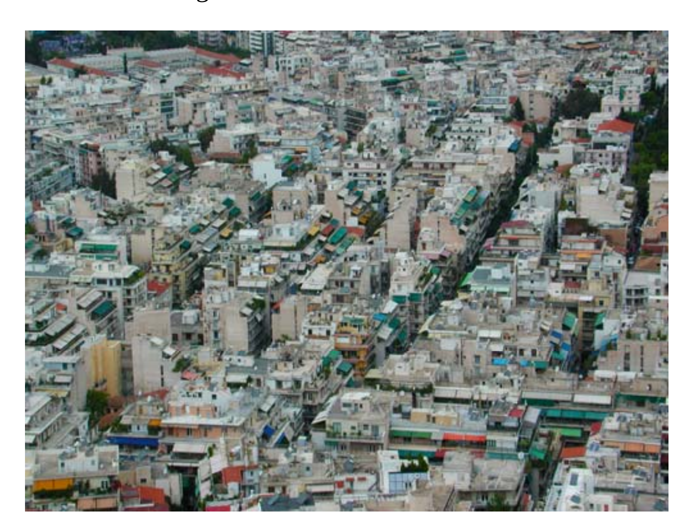


Fig. 9. La concentración demográfica en grandes conurbaciones corresponde a un modelo en los que la actividad del sector primario está mecanizada. El equilibrio territorial debe buscar nuevas vías diferentes de subvenciones coyunturales que presuponen la muerte segura. Centro urbano de Atenas, con una densidad de 200 habitantes por hectárea.

La concentración de la población es inherente al desarrollo y la estabilidad social, por lo que no parece razonable ni deseable una involución del fenómeno; sin embargo, los gobiernos dirigen buena parte de su esfuerzo económico a mantener un equilibrio inestable basado en la subvención a actividades. La consecuencia es una dependencia excesiva y un equilibrio social y económico extremadamente frágil.

La respuesta debe basarse en la integración territorial. La constitución de ámbitos rururbanos que reúnan todo el territorio y permitan forjar una estructura dúctil, capaz de responder con garantías a las alteraciones propias del desarrollo. Un ejemplo anecdótico, pero no banal, lo constituyen las redes de transporte para jóvenes que se organizan de forma pública, privada o mixta en las épocas de fiestas locales. Facilitan una movilidad discrecional multidireccional, aumentan la seguridad vial, facilitan la interrelación, desconcentran actividades y consumos y reducen costes e incomodidades.

[4] La vinculación del edificio con su entorno merece un tratamiento que desborda el desarrollo de este texto, por lo que se opta por señalar exclusivamente su importancia como elemento origen y definidor del ambiente artificial.

[5] El desarrollo de Internet ha permitido acceder a gran cantidad de información hasta hace poco tiempo desconocida; pero también ha dado lugar a una inflación de la información de baja calidad, que en un medio democrático, sin filtros cualitativos, logra acceder a posiciones y grados de reconocimiento injustificados y a propagar ideas e imágenes inverosímiles.



• La zonificación funcional tradicional produce una movilidad indeseable por su afección ambiental y energética

Las actividades industriales e incluso las administrativas han sido expulsadas de las áreas centrales urbanas con objeto de preservar el uso residencial. *(Curiosamente en algunos casos los nuevos usos introducidos resultan más molestos para la actividad residencial, (bares, etc.)).*

• Las formas de intervención obedecen a criterios de oportunidad

La estrategia a largo plazo no existe o es subvertida por la posibilidad de alcanzar mayores plusvalías económicas.

La búsqueda de resultados en el corto plazo lleva optar por las operaciones fáciles, independientemente de su idoneidad.

La ocupación extendida del territorio conlleva costos de deslocalización que dificultan la realización de operaciones coherentes.

Las infraestructuras viarias necesarias para el funcionamiento de las aglomeraciones humanas alcanzan una ocupación del territorio creciente con un gran impacto sobre su entorno espacial.

• La densidad edificatoria y la ocupación territorial responden a políticas erráticas apoyadas en opiniones nunca contrastables

La revisión de los postulados modernos y sobre todo de las realizaciones especulativas que los siguieron, la disciplina urbanística, ha optado por planeamientos de densidad decreciente que están siendo puestos ahora en crisis con justificaciones tan vanas como las que dieron lugar a su propagación.

La dificultad de realizar simulaciones válidas de comportamientos futuros ante la enorme cantidad de factores determinantes involucrados y la certeza de que todo modelo estará expuesto a graves alteraciones por factores nuevos no determinables apriorísticamente conlleva el peligro de que la estrategia de ocupación se base en opiniones, siempre subjetivas.

Se barajan actualmente densidades de 70 a 85 viv./Ha e incluso más con tipologías de baja altura, lo que implica una fuerte reducción de la ocupación de los equipamientos y sobre todo de la vialidad, no de las zonas verdes, que se plantean de verdad verdes.

• La densidad y la ocupación del territorio son en muchos casos consecuentes a las expectativas económicas generadas sobre el suelo

No existe un modelo único ni una densidad única válida, por lo que el grado de ocupación y la densidad deberían responder al resultado de la evaluación rigurosa por parte de agentes cualificados o de un concurso, de forma que no sean los mecanismos económicos de gestión los que determinen, según la presión especulativa de los propietarios del terreno, el grado de ocupación del territorio.

• Sigue existiendo una pugna entre el intervencionismo regulador europeo y el liberalismo negociado norteamericano

Es posible que la discusión sobre la densidad y el modelo de ciudad pueda producir estupor en Estados Unidos, Japón, China y tantos países que siguen la estela norteamericana, pero en Europa constituirá con seguridad un campo de discusión, en los próximos tiempos.

Finalmente el resultado tendrá poca importancia puesto que sólo afectará a una ínfima parte de nuestras urbes, pero servirá para derrochar esfuerzo intelectual que podría dedicarse a labores más productivas.

• La ruptura con la segregación de actividades humanas debe ser un objetivo fundamental

Hasta tiempos recientes el modelo de ciudad era un modelo mixto en el que convivían todas las actividades humanas. Sólo las actividades necesitadas de ubicaciones especiales o las algunas actividades MINP eran exteriores al continuo urbano.

La búsqueda de una comodidad fácil, apoyada en el transporte con automóvil condujo a la expulsión de la actividad productiva de las ciudades y a la especialización de áreas urbanas. (Poco recordamos la no tan lejana segregación social en altura de nuestras ciudades).

Expulsamos la actividad productiva mediante el automóvil y ahora nos quejamos de su uso generalizado y de que éste se utilice también como herramienta para acudir a zonas comerciales especializadas. De hecho, incluso nuestros cascos antiguos no dejan de ser zonas de ocio-comercio especializadas, aunque no accesibles en coche, (excepto para los vecinos).

Nuestra actitud respecto al automóvil resulta contradictoria. Todos pensamos que se debe utilizar menos, pero en nuestro análisis personal consideramos que hacemos un uso racional en un 80-90% de los casos.

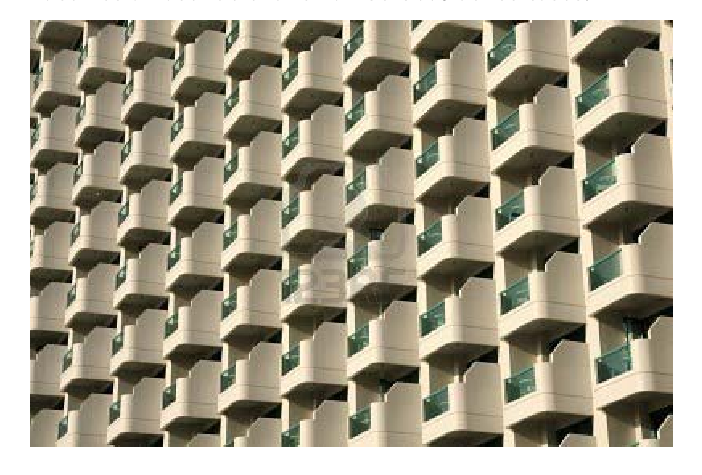


Fig. 10. La segregación de las actividades genera zonas residenciales altamente pobladas. Edificio de viviendas en Seúl, Corea del Sur.

• *La necesidad de sistemas de transportes públicos rápidos y ecológicos*

En algunas ciudades europeas han conservado el tranvía eléctrico y en otras se está volviendo a implantar, aunque con una entidad que lo convierte casi en una anécdota.

A la incorporación de fuentes de energía menos contaminantes, debe añadirse un diseño de transporte público superficial o subterráneo rápido y dotado de una red que cubra todo el espacio urbano. Las campañas de concienciación tienen un valor testimonial. Nadie puede utilizar medios de los que no dispone o cuya eficiencia es muy baja. Todos tendemos a utilizar los sistemas más eficientes y económicos, por lo que un transporte público eficiente no tiene nunca competencia con el automóvil. Pero, si un trayecto que se realiza en automóvil en 12 minutos es realizado en transporte público en 60 minutos, 5 veces más, el automóvil seguirá siendo una herramienta imprescindible.

Deben promoverse iniciativas basadas en tranvías o metrobuses, vehículos con prioridad permanente, trenes suburbanos, redes de transporte con paradas ubicadas a distancias adecuadas, con control de pago previo, paradas y vehículos adaptados para discapacitados, coches de niños y carros de compra, etc.



Fig. 11. Bit car. Concepto de vehículo eléctrico para uno o dos pasajeros para uso urbano. Tiene la capacidad de apilarse con otros coches semejantes, reduciendo así el área de aparcamiento. (Massachussets Institute of Technology)

• *La disminución del espacio viario*

Las nuevas tendencias pretenden disminuir el espacio destinado al automóvil, tanto en superficie como en el subsuelo.

Un cambio cultural de tal entidad sólo puede producirse en un tiempo muy largo o tras una crisis impensable en profundidad y velocidad ya que el propio modelo económico tiene uno de sus fundamentos en la producción de vehículos y las actividades relacionadas con ellos.

Sólo después de modificar el modelo de transporte sería viable pensar en la reducción del espacio destinado al automóvil.

No obstante, vincular las iniciativas públicas de vivienda y de apoyo a la creación de empresas a un compromiso social por el que las personas subsidiadas renuncian al uso del automóvil particular es una iniciativa ya adoptada en algunas operaciones (barrio de Krönsberg en Hannover), que puede constituir un comienzo. Además, la iniciativa permite reducir el costo de las viviendas, que podría destinarse a mejoras en el comportamiento ecológico de los edificios y del espacio urbano.



Fig. 12. Los tejidos urbanos complejos permiten un mayor aprovechamiento de las infraestructuras y de los equipamientos urbanos. Para ellos se deben fomentar usos mixtos y promocionar el transporte público y/o alternativo.

3.1.2. Emplazamiento de la edificación

• *El edificio como respuesta al ambiente*

Desde la antigüedad el emplazamiento de la edificación en el parcelario urbano ha sido inicialmente determinado atendiendo al medio ambiente local. Sin embargo, el paso del tiempo y con él, la modificación de las exigencias, especialmente las de carácter social y cultural y las posibilidades de conseguir un ambiente artificial interno diferenciado del ambiente natural han conducido a pervertir el estado inicial. La presión demográfica, las exigencias militares, el cambio del modelo comercial, la incorporación del automóvil, etc. han sido factores determinantes en la infravaloración de la influencia del ambiente en el emplazamiento del edificio [11].

• *El peso de la tipología en el acerbo cultural*

Nuestras ciudades son un conglomerado tipológico producido por la superposición de las exigencias de nuestra evolución social, cultural y tecnológica. Cada nueva tipología ha pretendido mantener los valores de las precedentes y evitar los conflictos producidos por la evolución en las tipologías precedentes.

Ninguna de las tipologías ha demostrado una validez incuestionable ni se ha mostrado incapaz de mantener un rango de eficiencia suficiente como para ser reconocida como óptima o al menos válida para determinados grupos sociales.

Es incluso habitual que grupos sociales de vanguardia, alejados de los postulados de las tipologías al uso se decanten por la recuperación para sí de tipologías

precedentes en las que interpretan valores que entienden desaparecidos o menospreciados en aquellas.

La ciudad futura será en cualquier caso la suma de todas las ciudades precedentes, modificadas continuamente pero permanentes en su esencia, por lo que la posibilidad de intervención deberá considerar todas las posibilidades de cada emplazamiento concreto, sin despreciar ninguna posibilidad de obtener beneficios de cada tipo de emplazamiento. *Recordemos como las torres de vientos paquistaníes son una respuesta a una forma de implantación aparentemente inadecuada para aprovechar las ventajas enfriadoras del viento.*



Fig. 13. Zona urbana tradicional con torres de viento para favorecer la refrigeración de los edificios dificultada por la densidad urbana.

El emplazamiento de nuestros edificios próximos debe considerar de forma fundamental la eficiencia ambiental y eso mismo implica no realizar planeamientos absolutamente deterministas en las organizaciones espaciales y volumétricas, sino establecer criterios y parámetros para la determinación de la eficiencia ecológica, paralelos a los que deben establecerse para determinar la eficiencia social o económica.

• *Ampliación del criterio de ocupación*

La ocupación del suelo público y privado por la edificación es una preocupación en casi todos los planeamientos. ¿Por qué estas limitaciones, que no siempre se corresponden con un control de densidad demográfica, si habitualmente las superficies no ocupadas resultan objeto de algún tipo de urbanización y en muchos casos son ocupadas por pseudo-construcciones auxiliares que desvirtúan el espíritu del planificador? ¿No sería más adecuado fijar condiciones al espacio auténticamente libre y verde y ser más flexibles con las condiciones de ocupación?

Un planteamiento verdaderamente ecológico debe velar más por la vitalidad del espacio verde, por su diversidad y por tanto, por su continuidad y viabilidad que por la ocupación.

• *Potenciación del espacio verde*

Los vegetales tienen una gran capacidad de descontaminación y de regulación térmica, además de producir un ambiente psicológico más equilibrado.

• *Atención a las características geológicas del subsuelo*

La planificación olvida en ocasiones los aspectos geológicos en el emplazamiento de la edificación, lo que se deriva en la utilización de un gran volumen de recursos y/o y la hipoteca de la intervención con nuevos consumos destinados al mantenimiento.

Se han ocupado con preferencia las áreas horizontales de los fondos de los valles, originadas por sedimentaciones milenarias y especialmente fértiles y se evita la ocupación de los terrenos rocosos con pendiente que exigen más imaginación y en general, menos recursos ambientales.



Fig. 14. La vegetación en zonas urbanas está presente tanto en espacios urbanos como en las cubiertas de los edificios. Vancouver, Canadá.

Curiosamente la forma de utilizar el territorio es opuesta a la que se ha realizado hasta los tiempos modernos. Todas las civilizaciones han optado siempre por ocupar las colinas y promontorios y reservar a la agricultura los terrenos horizontales fértiles.

Los terrenos con pendiente, rocosos, exigen menores cimientos, drenan mejor y permiten mayor ocupación para el mismo grado soleamiento y ventilación, a la vez que dan origen a una mayor diversidad tipológica.

• *Aprovechamiento del agua. Asignatura pendiente*

En nuestras ciudades la superficie vegetal permeable es mínima respecto a la superficie impermeable. Prácticamente todas ellas se riegan con agua procedente de redes de abastecimiento indiscriminadas. Se embalsa y se bombea agua, se filtra y se trata con agentes químicos biocidas para regar la vegetación.

Las justificaciones no resultan consistentes:

- *El costo de una infraestructura adicional para riego doblaría el actual***.** ¿Por qué tiene que existir otra red cuando se puede utilizar el agua de escorrentía de las superficies impermeables?
- *Se necesitarían costosos depósitos de reserva*. En muchas ciudades se obliga a la existencia de reservas para incendios redundantes cuyo volumen y costo supera el necesario para el uso de riego.
- *Podrían producirse problemas sanitarios por falta de potabilidad.*

El agua de riego y las reservas se mantienen en condiciones asépticas en ausencia de nutrientes y de luz. Sólo en el riego por aspersión, difusión y microdifusión se pueden generar aerosoles portadores de microorganismos, pero el peligro no es mayor que el que procede del agua pluvial. Bacterias patógenas como la Legionella se desarrollan con rangos de variación de temperatura pequeños próximos a los 40ºC, no habituales en el agua de riego excepto si se ha utilizado para refrigerar. En tal caso siempre son utilizables sistemas de desinfección basados en rayos ultravioleta.

La utilización de agua subterránea para riego e incluso para la refrigeración de los edificios es escasísima a pesar de contar con tecnología suficiente. No es raro encontrar durante la excavación de cimientos y sótanos de nuestros edificios cursos de agua con caudal y capacidad de enfriamiento suficiente para los usos del edificio que son drenados y evacuados a las redes públicas desperdiciando su capacidad reguladora ambiental. El aprovechamiento de tal capacidad debería ser exigido y fomentado por las autoridades, que por el contrario se muestran poco propicias a la autorización de sistemas que consideran “extraños”.

3.1.3. La orientación de la edificación

• Los efectos ambientales del viento: descontaminación y enfriamiento

La descontaminación ambiental se produce por reacciones químicas fundamentalmente biológicas producidas por las bacterias y los vegetales. En ausencia de ellos o si las concentraciones de contaminantes o sus características no son adecuados los contaminantes se acumulan y su toxicidad se incrementa y manifiesta.

Los componentes biocidas del aire procedentes de la actividad humana no discriminan entre seres deseables y detestables, de forma opuesta la variación de las características ambientales atmosféricas en entornos reducidos produce agresiones materiales y propicia la alteración del micro-ecosistema induciendo con el tiempo una modificación total del macro-ecosistema urbano [11].

El viento no tiene capacidad descontaminante, pero traslada los contaminantes y los diluye reduciendo la variación de los ecosistemas urbanos y favoreciendo la actuación biodescontaminante.

Los edificios de las sociedades precedentes eran mucho menos estancos al viento que los actuales, aunque quizás la cantidad de contaminación aérea fuese mayor. Nos olvidamos con frecuencia de que nuestra primera necesidad básica es respirar y que la necesidad de ventilación del edificio deriva en primer lugar de esta necesidad. La razón principal de cerrar nuestros edificios al viento, al aire, es disminuir su efecto térmico; pero si podemos controlar dicho efecto debemos optar por tener una ventilación máxima.

El aprovechamiento refrigerador del viento es una constante en todas las latitudes. Directamente o indirectamente, a través de equipos específicos, el enfriamiento de nuestros ambientes artificiales utiliza fundamentalmente el aire, en lo posible el viento para enfriar. La mayor parte del enfriamiento edificatorio y urbano se produce durante la noche por radiación; aunque podría aumentarse el efecto enfriador diurno. Durante este periodo el enfriamiento es propiciado principalmente por el viento generado por la convección atmosférica y la evaporación de agua directa o a través de los organismos vivos. (Se debe tener en cuenta que algunas latitudes la orografía produce efectos específicos de inversión térmica debido a la acumulación de capas nubosas) [7].

La arquitectura ecoeficiente debe extremar el cuidado en el aprovechamiento de las capacidades regeneradoras y acondicionadoras térmicas del viento mediante la correcta disposición y orientación de la edificación. Se debe sustituir la idea de protección frente al viento por la de control y aprovechamiento del viento.

Algunas arquitecturas programáticas proponen el aprovechamiento de la energía eólica en los edificios.

En general estas propuestas se refieren a edificios de gran altura o con un volumen superior al del entorno, lo que hace sospechar respecto a actitudes verdaderamente ecológicas, especialmente porque la energía obtenida representa no más del 3% de la energía consumida por el funcionamiento de tales edificios, probablemente menos de lo que exigen los sistemas de transporte interno necesarios.

El aprovechamiento eólico en los edificios para producir energía eléctrica, claramente deseable, exige todavía una investigación amplia ya que el aprovechamiento directo exige acumuladores poco ecológicos y la integración en la red general exige una potencia mínima sólo alcanzable con instalaciones colectivas. No obstante y a pesar del problema de contaminación sonora que pueden producir, son elementos que deben comenzar a formar parte de nuestra imagen urbana. Véase Fig. 15.

• La radiación solar es la fuente primera de la mayor parte de la energía que consumimos

La utilización racional de la energía debe comenzar por utilizar la energía con el menor número de transformaciones posibles. Toda transformación produce una degradación de la calidad de la energía, un desaprovechamiento.

Shoulder Seasons/ Summer Mode: air is drawn naturally in through large operable windows

South Gusting Winds abundant in Winnipeg, direct air into south wintergardens

Wintergarden 6-storey tall atria act as the building's lungs, drawing fresh air in and preconditioning it before it enters the workspace.

Winter Mode air is drawn in through outer mechanical units and heated by geothermal field

Inner Heating and Cooling Units further condition air as it passes into the raised floor distribution plenum

Waterfall 24 metre high water feature either humidifies or dehumidifies air as it enters the building

Parkade limited to 200 spots to encourage employees to take public transit, and use parking spaces in city

Solar Chimney 115 metre high solar chimney uses stack effect

Shoulder Seasons/ Summer Mode draws used air up and exhausts it out of the building

Exposed Ceiling Mass uses radiant heating and cooling; warm air rises and is drawn into north atria via natural pressure differences

100% Fresh Air, 24/7 in all office spaces is drawn through the raised access fl oor

Winter Mode chimney closes, fans drawn warm exhaust air down, and recirculate it to warm the parkade. Heat exchangers re-capture heat and return it to south wintergardens to preheat incoming air

Geothermal System 280 boreholes, 125 metres deep draw excess heat or cold stored within the soil to condition the building.

Fresh Air

Exhaust Air

Heating and Cooling Systems

Fig. 15. Oficinas de Manitoba Hydro, Winnipeg, Canadá. La doble fachada activa del edificio aprovecha los vientos dominantes y los precalienta/preenfría para proveer el aire de renovación del edificio (KPMB arquitectos).

La utilización directa de la energía solar produce el mayor grado de aprovechamiento.

El carácter electromagnético de la energía solar y su composición compleja exigen la adecuación geométrica de la arquitectura para su aprovechamiento, la orientación del volumen y los espacios generados y la utilización idónea de elementos y materiales constructivos que permitan la transmisión de la energía hasta los lugares de consumo.

La optimización del aprovechamiento energético solar lleva en ocasiones a exagerar los aspectos relacionados con la orientación sin tener en cuenta que la eficiencia global exige una evaluación compleja en la que el aprovechamiento solar directo tiene una importancia relativa, no absoluta [11].



Fig. 16. 78+12 VPO en Sarriguren, Pamplona. Fachada ventilada activa orientada a sur. El aprovechamiento de la energía solar permite reducir un 8% el consumo de energía en calefacción.

Esta advertencia es especialmente necesaria por cuanto en ocasiones el afán de aprovechamiento lleva a una utilización de tecnologías complejas (paneles solares) en posiciones en las que el aprovechamiento es insuficiente, o a construir espacios cuyo rendimiento es dudoso.

3.1.4. La influencia del entorno es determinante de las medidas que se deben adoptar en la implantación edificatoria

Quedan lejos los planeamientos higienistas modernos que exigían el soleamiento y la ventilación adecuada de los edificios. El control de las enfermedades mediante medicamentos y la evolución en la higiene personal hicieron olvidar en pocos decenios la falta de salubridad que producen el hacinamiento edificatorio y las deficiencias de soleamiento y ventilación.

La preocupación por la imagen idealizada de las ciudades y los movimientos nostálgicos han originado crecimientos urbanos deficitarios en una concepción ecológica, tanto por responder a una concepción fundamentalmente escénica como por el establecimiento de una normativa edificatoria esclerotizante.

La nueva edificación debe observar el entorno próximo y aprovechar al máximo las posibilidades que permiten la orografía natural y urbana. El estudio del sombreamiento, de la reflectancia y absorción y de los flujos eólicos del área afectada debería ser obligatorio en todas las intervenciones edificatorias.

También es fundamental el análisis detallado del acceso a recursos ambientales aéreos y terrestres en las áreas intervenidas.



Fig. 17. Sede regional de las Naciones Unidas, Panamá.

3.2. El clima

3.2.1. La temperatura

• *La variación de la temperatura*

El aprovechamiento energético exige coordinar los comportamientos térmicos del clima, el edificio y la actividad humana que se desarrolla en su interior. Existe una tendencia a utilizar recetas sencillas de utilización general, *(algo así como el valor social que se da a los analgésicos sencillos para curar todas las enfermedades en las culturas no desarrolladas).*

Es cierto que la inercia edificatoria permite equilibrar los cambios bruscos de temperatura, pero ¿es esto deseable en todos los casos? El mantenimiento permanente de un gradiente de temperatura entre los ambientes interno y externo produce un flujo térmico y por tanto, un consumo energético.

La coordinación térmica debe estudiarse para los ciclos diario, estacional y anual y se deben considerar todos los elementos físicos afectados, edificio, clima, terreno, sin olvidar elementos contenedores de agua, que actúan como acumuladores térmicos.

El estudio del flujo térmico debe considerarse en sentido positivo y negativo con todos los posibles intercambiadores estáticos y dinámicos. El afán simplificador produce en muchos casos desaprovechamientos energéticos considerables. *(Desaprovechamiento de los intercambios térmicos correspondientes a las superficies opacas).*



Fig. 18. La incorporación de contenedores de agua en los edificios permite aumentar la estabilidad térmica ambiental, aunque debe controlarse el grado de humedad relativa. Estanque interior en un edificio de la Universidad de Qatar, Doha.

Similar atención merece el estudio de las características de los intercambios térmicos, que se producen simultáneamente por radiación, conducción y convección sin que se tengan en muchos casos en cuenta efectos calificables como de segundo orden, a pesar de su entidad cuantitativa y cualitativa. *(Efecto de la radiación directa incidente sobre el usuario a través de acristalamientos con un alto grado de filtraje y aislamiento térmico).*

Tampoco se debe olvidar que parte de la radiación solar tiene cualidades lumínicas y que la filtración de la radiación, discriminada o indiscriminada afecta a la sensación luminosa. La práctica de controles autónomos con aprovechamientos térmicos y luminosos de la radiación solar es extremadamente difícil y probablemente está injustificada excepto en casos específicos ajenos a la actividad edificatoria general [3].

3.2.2. Control de la humedad ambiental

• Sobre el agua en estado líquido

La necesidad de aprovechar el agua pluvial y por tanto de establecer medidas para su aprovechamiento ha sido mencionada anteriormente.

En muchas latitudes el régimen pluvial hace innecesarias medidas extraordinarias para el aprovechamiento del agua de lluvia. La tradición y un estudio adecuado son recomendables para determinar la actitud en cada caso concreto [4] [11].



Fig. 19. La gestión adecuada del agua líquida exige la adaptación de las actividades y los medios a las características ambientales de cada lugar, evitando soluciones genéricas cuyo resultado resulta siempre ineficiente. Vegetación urbana de Ciudad de Panamá.



Fig. 20. Sudoración extrema producida por a exposición durante el proceso de ejecución de una obra a una humedad relativa muy elevada. El traslado entre ambientes con temperaturas y grados de humedad relativa muy distantes da lugar a problemas de salud.

• El vapor de agua

La insuficiente consideración de la humedad en los ambientes edificados es una deficiencia generalizada, a pesar de su influencia en la comodidad y en la salud de las personas y su influencia en la percepción térmica.

Los ambientes artificiales [12] que generamos acostumbran a descuidar el control de la humedad y actúan fundamentalmente sobre la temperatura, de forma que para evitar las humedades relativas excesivas se mantienen habitualmente ambientes secos que producen incomodidad y problemas de salud en las vías respiratorias. Véase Fig. 20.

• El hielo

La generación de hielo sobre los elementos constructivos y especialmente en su interior es un fenómeno indeseable excepto cuando se ha planteado con carácter específico.

El aumento de volumen experimentado por el agua en su congelación produce tensiones elevadas capaces de romper elementos y materiales de gran resistencia.



Fig. 21. Edificio industrial en la ciudad de Broclav en el que puede apreciarse el aislamiento de todos los cerramientos, incluyendo el de los cimientos.

En los sistemas de enfriamiento aéreos produce la congelación de las baterías de condensación con una importante reducción del rendimiento al tener que destinar energía calorífica para descongelarlas.

En latitudes frías debe tenerse precaución en los sistemas que se relacionan con el terreno en su capa superficial. Es importante conocer cual es la profundidad en la que existe posibilidad de congelación.

3.2.3. Control de agentes contaminantes gaseosos

La construcción no produce importantes afecciones contaminantes durante la construcción, aunque algunos de los elementos constituyentes proceden de actividades o contienen productos que han resultado contaminantes en algún momento durante su proceso de fabricación.

Durante el funcionamiento del edifico, aparte de los procesos para mantener el funcionamiento del edificio, transformaciones energéticas, el edificio no produce agentes contaminantes; aunque las actividades que albergue producirán residuos específicos.

Desgraciadamente la búsqueda de la comodidad ha contribuido a que las actividades consideradas menos contaminantes, domésticas y asimilables, den origen a un elevado y variado conjunto de residuos contaminantes, gaseosos, líquidos y sólidos que no están relacionados con la actividad constructiva.

Los contaminantes aéreos debidos al funcionamiento de los edificios proceden fundamentalmente del consumo de combustibles y están relacionados cualitativamente con el tipo y la calidad de la combustión y cuantitativamente con la demanda energética del edificio.

La reducción de la contaminación exige la utilización de combustibles poco contaminantes, la utilización de sistemas de alto rendimiento, el control efectivo del proceso de combustión y fundamentalmente la reducción de la demanda energética de combustibles fósiles mediante el control riguroso de la transmisión de calor del edificio y la utilización de fuentes de energía renovables [1].



Fig. 22. Es frecuente que las políticas de reducción de consumo energético se dirijan hacia las tecnologías innovadoras, más mediáticas, que hacia la mejora del rendimiento de los sistemas energéticos existentes, que en muchos casos alcanzan grados de eficiencia muy superiores a aquellas.

Es común la sobrevaloración del uso anecdótico de fuentes energéticas alternativas a los combustibles fósiles mientras la mayor parte de la energía consumida por el edificio utiliza sistemas energéticos convencionales con un rendimiento no optimizado.

3.3. La cultura y la costumbre

3.3.1. La concepción global

La progresiva globalización de la información, de la cultura, la comunicación y el consumo están produciendo la asimilación de aspectos culturales ajenos que con el tiempo producirán una fuerte hibridación cultural y una simultánea reducción de la diversidad cultural.

La construcción en civilizaciones aisladas ha seguido pautas asimilables, guiadas por las características instintivas de la especie humana de búsqueda de seguridad, y la organización social inherente a la especie.

En todo momento las sociedades humanas han estructurado su hábitat artificial en relación con los recursos de su entorno accesible, explorando nuevos territorios y emigrando cuando los recursos eran escasos o se encontraba un lugar más apto donde habitar. El sedentarismo corresponde a una etapa relativamente reciente en la que la capacidad de transporte permite acceder a recursos progresivamente más lejanos hasta alcanzar la plenitud del planeta. Por ello, la organización de la explotación de recursos no puede hoy depender de una comunidad determinada sino considerarse de modo global.

En otro caso ninguna comunidad se preocupará por la conservación de los recursos y se producirá el agotamiento total.

A pesar de los indudables aspectos negativos que produce la globalización se producirán con seguridad transferencias en la utilización de sistemas y elementos constructivos, que permitirán un mejor aprovechamiento de los recursos ambientales.

A pesar del poco tiempo de existencia de internet y de que la mayor parte de las sociedades humanas no cuentan con un desarrollo suficiente, es posible acceder a información procedente de cualquier parte del globo y en poco tiempo existirán motores de búsqueda y sistemas de transacción de tecnología o de comercio desarrollados.

Vivimos en los albores de la era de la tecnología globalizada y sobre todo del acceso global, no dependiente de las grandes corporaciones comerciales.

• *La respuesta cultural local*

La globalización tiene como respuesta simétrica la profundización en la cultura y las tradiciones locales.

El mantenimiento del equilibrio entre la búsqueda del aumento del rendimiento y la conservación de la diversidad constituye un ejercicio complejo no exento de peligros por la facilidad con que se impregna de motivaciones sociales de otra índole (política, económica, etc.).

La estructura urbana y la arquitectura, por su permanencia e inmovilidad constituyen quizás los exponentes más visibles de cada sociedad, por lo que existe siempre cierto rechazo a todas las intervenciones que pueden ser consideradas como modificadoras de sus símbolos identificativos.

Desgraciadamente la valoración simbólica se corresponde habitualmente con los aspectos visuales más superficiales, por lo que nuestras ciudades pueden llegar a convertirse en auténticos escenarios de cartón piedra y reducirse la cultura arquitectónica y constructiva a muestras fósiles visitables en los pocos edificios que consigan algún tipo de catalogación cultural.

Ante este hecho inevitable debemos actuar proponiendo y aceptando una actualización de los sistemas edificatorios que permita conservar los conceptos de la cultura local introduciendo, como se ha hecho siempre todo aquello que en cada momento ha demostrado mayor eficiencia.

Gran parte de la arquitectura que podemos ver en las revistas de arquitectura tiene carácter coyuntural, responde a motivaciones efímeras y carece del grado de eficiencia exigible a su momento, por lo que su futuro es incierto.

Hasta tiempos recientes la arquitectura se ha considerado siempre un bien de inversión, como bien inmueble; sin embargo, la inversión de la relación entre el valor del edificio y el valor del suelo sobre el que se asienta, antes favorable al primero implica que la existencia del edificio esté condicionada al rendimiento socio-económico de la actividad que alberga. Esta nueva situación da lugar a arquitecturas de carácter efímero en las que la posibilidad de desmantelamiento adquiere un valor relevante.



Fig. 23. Las construcciones responden a exigencias funcionales temporales que justifican su existencia. Una vez cumplidas deben concluir su ciclo de vida con la máxima eficiencia. Edificio destinado a atender funciones de un hospital durante un proceso de reestructuración y rehabilitación.

• La influencia de la estructura social

La pertenencia a un determinado grupo social y el reconocimiento dentro del mismo constituyen dos necesidades humanas de primer rango. En nuestra forma de comportarnos, nuestro vestido, aficiones, lugar de residencia, puesto de trabajo, automóvil no existe un determinismo pleno; pero si realizamos un análisis cuidadoso podemos observar que la sociedad es perfectamente estructurable a partir de sus pautas de comportamiento.

Las tipologías de la residencia o de la factoría resultan afectadas por la imagen que el usuario o el empresario quieren proyectar a su grupo social.

Este aspecto es utilizado como herramienta por los responsables de marketing para propagar sus productos, facilitando el acceso a los mismos a las personas que consideran líderes de opinión en su área específica.

En sentido coloquial nos referimos a este tipo de acción como manipulación comercial; pero aunque la consideremos con carácter negativo, debemos pensar que es consustancial a la sociedad y que por tanto, debe dirigirse de forma positiva para inducir actitudes más acordes con una construcción ecoeficiente.

La etiqueta "ecológico" tiene un valor social positivo, pero en muchos casos los productos que la portan no responden a los valores sociales al uso. Es fundamental saltar la barrera de los activistas, técnicos y científicos y alcanzar los grupos con mayor trascendencia mediática, los que cuentan con una respuesta social más amplia. Basta de campañas generalizadas para intentar convencer de criterios generales a ciudadanos que los aceptan sin ofrecer ninguna oposición.

Es fundamental ofrecer objetos concretos, ejemplos reales o virtuales que se integren en el espacio cotidiano de los héroes o villanos sociales del momento.

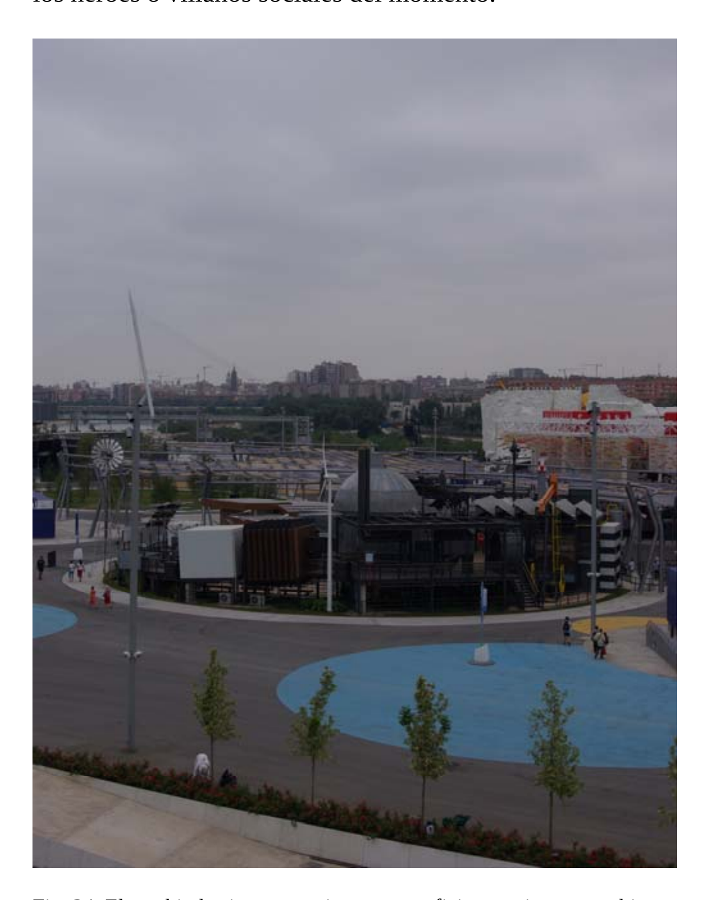


Fig. 24. El cambio hacia una arquitectura ecoeficiente exige un cambio en los patrones de valoración que consideren el ciclo de vida completo de la edificación sus componentes. Mientras se produce la transformación son necesarias acciones que la impulsen, y promuevan y faciliten el cambio. Las grandes exposiciones, como Expoagua corresponden a ese frente de actuaciones.

La arquitectura y los espacios ecoeficientes deberían ser promovidos y quizás hasta subvencionados en los edificios públicos, en las películas de cine, en la televisión y en la publicidad, de manera que la masa social sienta la necesidad de que su vida se desarrolle en un entorno ecoeficiente.

Es habitual trasladar la responsabilidad a los usuarios finales, como si ellos pudiesen de verdad hacer algo más que seguir las normas y votar cuando llega el momento. Son los poderes públicos los que deben organizar y catalizar el cambio.

Muchas de las acciones referentes al aprovechamiento energético dependen de cambios en los modelos de uso de la energía sólo posibles desde los poderes públicos.

El mantenimiento durante años de una deficiente normativa de propiedad horizontal ha conducido a que gran parte del parque inmobiliario colectivo más reciente se haya construido con sistemas de acondicionamiento individuales cuyo rendimiento global es bajo y en los que la sustitución de la fuente de energía será problemática y exija cuantiosas inversiones.

Mientras Londres ya ha planteado su estrategia hasta el año 2050 en la que este tipo de instalaciones es inviable, aquí se siguen utilizando y lo que es peor, la consideración social es superior a las que presumiblemente alcanzan mejores rendimientos.

3.4. El conocimiento de la construcción ecológica

3.4.1. La experiencia

La evolución constructiva depende más del conocimiento empírico que de actitudes científicas. Esto no significa que el conocimiento científico carezca de importancia, sino que no abarca el conjunto de la actividad. Se corresponde con algunos edificios simbólicos y con los esfuerzos dispersos parciales empresariales, profesionales, universitarios, etc.

El traslado del avance tecnológico se produce a través del mercado, de forma difusa, fundamentalmente a través de experiencias próximas que muestran su mayor rendimiento. Toda innovación que olvide este hecho está condenada al fracaso, es el grado de difusión el que fija su velocidad de desarrollo.

3.4.2. La formación

La actividad constructiva no es piramidal ni continua como ocurre en otras industrias. El diseño no corresponde en la mayor parte de los casos a la empresa ejecutora, que excepto en contados casos carece de técnicos con un conocimiento tecnológico profundo en todas las áreas que afectan a la actividad. No conviene olvidar que en cualquier intervención, por pequeña que sea, participan varios técnicos externos y en ocasiones no existe ninguno correspondiente al agente ejecutor.

La formación debe seguir un camino doble:

- Científico en la formación primera de los técnicos implicados en la construcción, que adquirirán experiencia en su actividad posterior.
- Empírico en la formación del personal ejecutor, cuya base científica no es suficiente para alcanzar un conocimiento correcto científico debido a la multitud de aspectos que afectan a cualquier elemento.

3.4.3. La transferencia tecnológica

Tiene una gran importancia en el sector constructivo. Cada día nuevos productos y sistemas provenientes de sectores y países más avanzados tecnológicamente se introducen en la actividad produciendo una evolución, en muchos casos imperceptible, y no en todos los casos saludable y positiva.

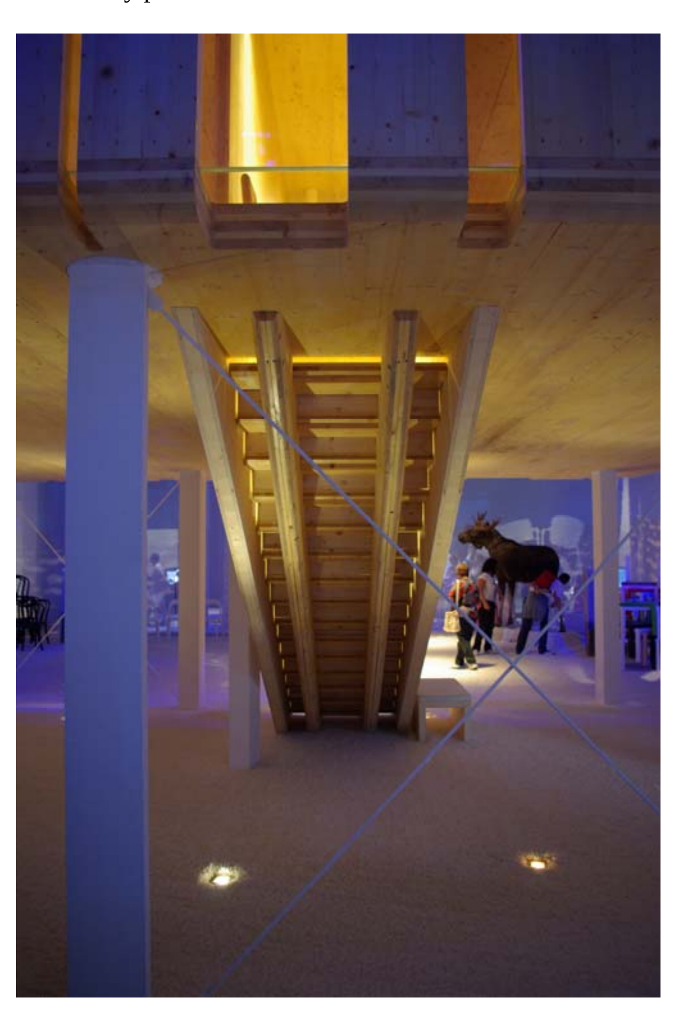


Fig. 25. El pabellón sueco de Expoagua, Zaragoza 2008, dedicaba una parte de su exposición a productos desarrollados a partir de la utilización de transferencias tecnológicas.

El cambio introducido por la LOE hacia un sistema de responsabilidad civil garantista lleva aparejada la demostración de la idoneidad de los nuevos productos que se incorporan a la construcción. Esta actitud favorece la innovación ya que sólo son utilizables soluciones que han mostrado científicamente su eficiencia y por tanto,

compiten en un campo regulado que justifica y exige un desarrollo científico del proceso de diseño.

3.5. Los medios

3.5.1. Personales

La mayor parte de los profesionales y operarios del sector de la construcción son sensibles a las actitudes ecológicas, que les afectan de forma primera y con más intensidad; pero es necesario establecer planes de formación adecuados, adaptados a cada nivel de formación previa, e incentivar las actitudes ecológicas.

También es importante fomentar cierto grado de activismo ecológico ya que las inercias del sistema son enormes. No conviene olvidar que más de la mitad de las decisiones sobre producción están en 500 Consejos de Administración, menos de 10.000 personas.

3.5.2. Materiales

Existen materiales y sistemas alternativos en casi todas las áreas con mayor rendimiento ambiental que el correspondiente a los materiales usados habitualmente. Los que tienen un buen rendimiento económico no tienen grandes dificultades para introducirse en el mercado, pero gran parte de ellos no alcanzan ese rendimiento económico por razones diversas entre las que es fundamental el volumen de ventas y por tanto de producción. (Sólo los productos de las grandes multinacionales tienen capacidad de introducirse con facilidad al aunar capacidad económica, comercial, de desarrollo, etc.).



Fig. 26. Nuevos materiales desarrollados con concepciones ecoeficientes deben competir con productos tradicionales sometidos a exigencias menores, lo que dificulta su competitividad. Bloque CLIMABLOC fabricado con residuos de madera.

Desgraciadamente sin la intervención normativa o incentivadora de las administraciones el avance sólo se produciría en la dirección en que produzca mayor rendimiento económico a las grandes empresas.

3.5.3. Medios auxiliares

Se da cierta tendencia a identificar los productos ecocompatibles con la producción artesanal.

En general tendemos a identificar como artesano al sistema de producción cuyo rendimiento productivo ha sido superado por nuevos sistemas que reducen el grado de intervención humana.

La industrialización de procesos reduce la influencia personal en favor de una producción más amplia y una garantía de calidad; no todos los artesanos alcanzan el mismo grado de pericia y por tanto de calidad.

Cada grupo social posee un grado de desarrollo y sus sistemas productivos se corresponden con él. El equilibrio sólo puede romperse en la dirección en que se produce un mayor rendimiento económico. El avance en la dirección opuesta es siempre inestable y depende de decisiones políticas o personales.

Una industrialización ecoeficiente proporciona por el contrario la actitud más segura ya que cada escalón que se supera proporciona más estabilidad.

El mercado es una herramienta fundamental del desarrollo humano, es bueno en sí mismo, aunque deben establecerse normas que impidan que se convierta en una correa de poder económico de unas pocas empresas o unos pocos países; y el único modo es generar y promocionar empresas que cuenten con un alto valor ecológico, o transformar las existentes, que es mucho menos costoso. Es interesante observar como las empresas alemanas se readaptan y regeneran en cada generación y se adaptan a las nuevas exigencias, aprovechando el valor y la experiencia acumulados, en nuestro país son raras las empresas que consiguen sobrevivir a una generación. Quizás es un rasgo cultural; pero en cualquier caso dista de ser ecoeficiente y razonable.

3.5.4. Medios económicos y financieros

La nueva conciencia ecológica global y cierto interés en no quedar relegado tecnológicamente han llevado a casi todos los estados a promocionar y subvencionar la investigación, el desarrollo y la producción de sistemas y materiales ecocompatibles.

Podríamos por tanto pensar que la construcción ecoeficiente debería resultar más económica que la realizada de forma convencional; pero la realidad es que la construcción ecoeficiente resulta hoy más cara, aunque se produzca un ahorro global al tener en cuenta los costos de funcionamiento y de desmantelamiento.

En realidad, puesto que la financiación de la edificación se realiza a largo plazo, 10-15 años en edificios de actividad económica y 25-35 años en edificios residenciales el resultado final es ya favorable a los edificios ecoeficientes.

¿Dónde está el problema?

En que el costo inicial está determinado por la capacidad crediticia de los compradores. Si su capacidad aumenta, el precio inicial aumenta y el valor se traslada directamente al terreno, que no aporta nada.

Por lo tanto, la financiación se puede convertir en una herramienta importante y sencilla de actuación. Simplemente con favorecer una financiación a más largo plazo de los edificios ecoeficientes el panorama variaría de forma radical y el costo podría ser nulo si se articulase de forma conjunta con otras medidas normativas.

En un momento con poca actividad constructora no deberían existir problemas para dirigir el comportamiento de los agentes implicados e incluso promover actividades rehabilitadoras ecoeficientes, que son necesarias y servirán para reactivar el sector tras agotarse la fiebre adquisitiva.

3.6. Tipología y ecología arquitectónica

3.6.1. Casas o artefactos

Resulta muy sorprendente comprobar como en nuestras latitudes se sigue construyendo con tipologías y todavía en algunos casos técnicas ya experimentadas en los tiempos de Roma.

La evolución social y tecnológica han producido alteraciones progresivas en la estructura urbana y arquitectónica, pero existe un rechazo social a la modificación radical de uno de los exponentes culturales más identificativos.

En general, las propuestas de arquitectura sostenible parten de planteamientos maximalistas poco identificables con las posturas moderadas de la masa social.

No debemos confundirnos. Ninguna tipología que tenga por objetivo primero la obtención de la máxima eficiencia ecológica logrará imponerse a costa de cambios tipológicos importantes.

La arquitectura maximalista produce iconos pero no ciudad. La arquitectura ecoeficiente deberá recorrer un largo camino de hibridación, que llevará sin duda a una mutación total cuyas características tipológicas corresponden en la actualidad al campo de la ficción.

4. Sistemas constructivos ecocompatibles.

4.1. Sistema terreno-cimiento

Las actuaciones referidas a este sistema están profundamente condicionadas por las pautas socio-económicas urbanas. El modelo urbano actual ha tendido a una reducción de la densidad edificatoria relativa (nº viv./Ha), con un suelo ocupado proporcionalmente reducido (<35%) y superficie verde real exigua (<10%). Los sistemas destinados a viales y a aparcamiento de vehículos ocupan el 80% de la superficie si consideramos que habitualmente la superficie ocupada por los aparcamientos subterráneos se prolonga más allá de los límites de la edificación situada sobre el terreno.

Si entendemos el sistema en un sentido amplio: “el que sirve para transmitir cargas al terreno”, el amplio grado de urbanización exige un acondicionamiento del terreno casi total y la consiguiente transformación global del ámbito afectado.

Aun en un sentido restringido, la utilización del subsuelo para aparcamiento y usos auxiliares, trasteros, salas de instalaciones, etc. implica grandes movimientos de terreno a los que se debe dar acomodo.

La organización de la actividad constructiva no considera habitualmente la posibilidad de reducir la afección de tal transformación debido a concebirse como actividades consecutivas.

La arquitectura ecoeficiente debe evitar los movimientos de tierras y excavaciones generalizadas. Los sistemas rápidos de transporte público de viajeros constituyen un componente fundamental para reducir el impacto que exigen las infraestructuras destinadas al tráfico de vehículos.

El planeamiento debería fijar entre sus parámetros el correspondiente a la superficie no afectada por ningún tipo de construcción.

Fig. 27. La sociedad valora el reconocimiento a través de la asunción de los gustos e iconos de otras sociedades que considera sobresalientes y con las que espera relacionarse. Algunos edificios como este de Zaragoza no responden a razones funcionales sino a la voluntad de reconocimiento.



Fig. 28. La ecoeficiencia es patrimonio de sociedades maduras, conscientes de su necesidad de equilibrio; pero son muchas más las que desarrollan su actividad sin atender a sus exigencias totales. Destrucción en barrio en Trípoli en 2010.

En general el sistema terreno-cimiento resulta desproporcionado atendiendo a las cargas transmitidas y las características de la estructura y del terreno.

Ante el desconocimiento cierto del comportamiento del terreno se ha actuado tradicionalmente con un elevadísimo coeficiente de seguridad, que implica sobredimensión.

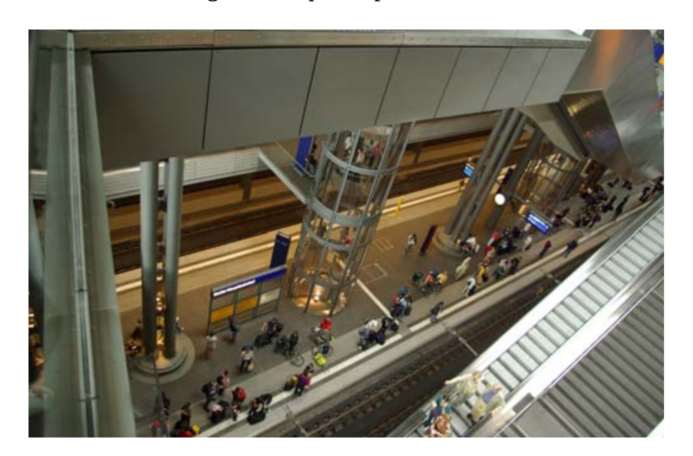


Fig. 29. Los sistemas rápidos de transporte público constituyen un instrumento básico en la evolución hacia una cultura de sostenibilidad. Metro de Madrid, 2012.

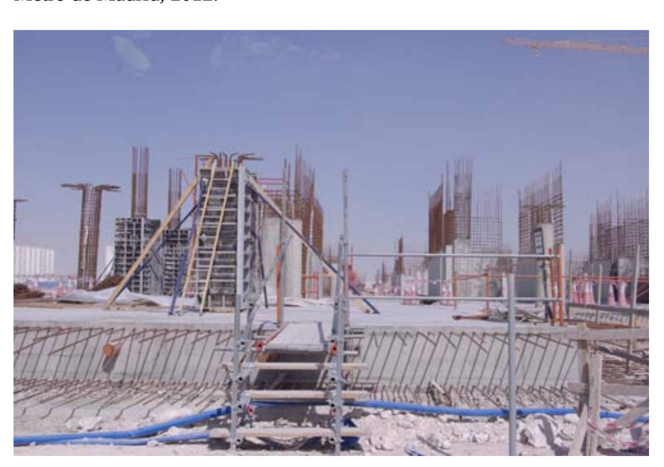


Fig. 30. El desconocimiento del comportamiento del terreno y otras incertidumbres, como las inconcreciones de los proyectos dan origen a sobredimensionamientos injustificados de los cimientos. En la imagen placa de cimentación superficial para un edificio de 3 plantas.

El sobredimensionamiento

Las exigencias de la nueva normativa de edificación pueden ayudar a corregir estos desfases, aunque no existen en ella referencias destacables respecto a la preocupación ambiental.

Actualmente existen medios no demasiado costosos para contar con un mejor conocimiento de la estructura y el comportamiento del terreno, que debe permitir el ajuste interno del sistema terreno-cimiento.

En los edificios de poca altura que no transmiten cargas puntuales intensas se debe optar por cimientos superficiales formados por una capa de superficial de granulometría amplia (80-120mm.) y una placa de hormigón armado con armadura de fondo bajo puntos y líneas de transmisión de carga y malla superior ligera.



Fig. 31. CLASP fue una iniciativa británica para edificación eficiente de edificios de equipamiento, principalmente escuelas desarrollado a partir de los años 50 que ha tenido continuidad hasta nuestros días a través de programas de actualización. Desarrollado inicialmente para zonas mineras, se trataba de un sistema ligero, flexible y resistente, además de muy eficiente, como han demostrado la durabilidad de los edificios realizados y la continuidad del programa. Estación de Ashtead, 1968. CLASP. Hassocks5489. (Fuente: Wikipedia).

La capa granular permite la difusión de las tensiones puntuales y evita el paso de agua líquida. Simultáneamente debe revisarse el cumplimiento de las exigencias de impermeabilidad establecidas por el CTE SH-1, correspondientes a suelos.[6]

El paso de vapor de agua desde el terreno al interior de los espacios habitados a través del lecho de grava no es en general indeseable ya que generalmente los ambientes internos de las viviendas son excesivamente secos (a excepción de zonas litorales). No es deseable cuando se prevén en el edificio temperaturas interiores inferiores a la temperatura del subsuelo debido al riesgo de condensaciones. Excepto cuando se tiene un conocimiento amplio y experimental del terreno, conviene realizar una comprobación de la limitación de condensaciones[7].

La utilización de sistemas de almacenamiento más sofisticados, mediante la utilización de bloques huecos, o recipientes con agua específicos resulta cara y complicada para utilizar por el usuario.

La utilización de aljibes, especialmente los destinados a reserva contra incendios puede resultar muy interesante ya que su aprovechamiento no incrementa demasiado el costo.

En estos casos debe proporcionarse un estudio justificativo del cumplimiento de las exigencias básicas del CTE.[8]

---

[6] CTE HS-1, 2.2 Suelos, 2.2.2 Condiciones de las soluciones constructivas.

[7] CTE HE-1. 3.2.3.

[8] CTE Parte 1. Art.5.3. b). “Soluciones alternativas”, entendidas como aquellas que se aparten total o parcialmente de los DB. El proyectista o el director de la obra pueden, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a los que se obtendrían por la aplicación de los DB.

Es posible utilizar la capa granular como acumulador de calor. En tal caso debe construirse una red de conductos que facilite el intercambio de calor entre el fluido utilizado en la transmisión (aire, agua, etc.) y la sub-base. La utilización de grava de granulometría elevada facilita el paso del aire y la red de conductos puede reducirse a los colectores.

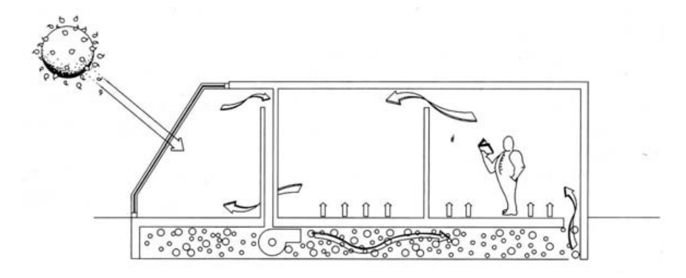


Fig. 32. La utilización de lechos de grava permite acumular calor en el suelo de forma económica y eficiente en edificios de poca altura dotados de cerramientos captadores. Distribución y acumulación del aire caliente a través de un lecho de grava bajo el suelo. (Fuente: Neila, J; 2004)

Las redes de conductos pueden también incorporarse directamente al terreno con objeto de aumentar la masa acumuladora y reducir el costo. Estos conductos deben tener una sección suficiente para permitir su inspección y mantenimiento en condiciones de salubridad. En nuestras latitudes la temperatura del terreno en sus capas superiores se sitúa entre los 10 y los 20º [4].

En edificios de pisos, en los que las cargas mecánicas se concentran en puntos la reducción de afecciones (reducción del volumen de excavación y relleno posterior) debe conducir a metodologías que utilicen al máximo la capacidad mecánica de los sistemas, con reducción de los coeficientes de seguridad justificada por estudios geotécnicos profundos e intensos, previos y durante la ejecución que garanticen el comportamiento previsto. La utilización de sistemas semiprofundos (pozos de cimentación) debe ser evitada en favor de sistemas superficiales y profundos.



Fig. 33. Una de las causas del sobredimensionamiento de los cimientos es el uso de material auxiliar adecuado. En la fotografía, cimientos de edificios ejecutados con las dimensiones adecuadas mediante la utilización de encofrados.

Existe cierta preocupación por la contaminación de acuíferos durante la ejecución de obras que alcanzan el nivel freático. Puesto que el terreno normalmente es permeable hasta la cota del nivel freático la preocupación no debe ser diferente a la que corresponde a los vertidos superficiales. No existe todavía una conciencia suficiente respecto a la contaminación de las aguas subálveas, pero en cualquier caso el peligro de contaminación durante estas tareas está fundamentalmente relacionado con la posibilidad de que el vertido alcance el acuífero de forma rápida y concentrada más que por el grado de afección.

La realización de rellenos drenantes requiere un comentario específico. La utilización de materiales y sistemas diversos está más relacionada con la búsqueda intuitiva de un mayor grado de seguridad ante la filtración de agua al interior del edificio que al conocimiento cierto del comportamiento de los mismos.

La obtención de una mayor garantía se identifica con la acumulación de sistemas y con seguridad con un derroche de materiales y residuos desacordes con una actitud ecoeficiente. Resultan necesarias investigaciones rigurosas e independientes que permitan evaluar el comportamiento relativo de las diferentes soluciones utilizables.

En general, el volumen de los cimientos excede lo calculado. La falta de medios adecuados contribuye a que resulte más económico desaprovechar hormigón que ajustar los elementos a las dimensiones previstas.

Los sistemas de cimiento y contención pueden ser utilizados directamente como acumuladores térmicos mediante la incorporación de conductos o de cámaras (dependiendo del tipo de edificio). La utilización de estos sistemas permite aumentar el espesor y por tanto la rigidez del conjunto a la vez que se reduce su masa [4].

4.2. Sistema estructural

En edificios de poca altura con usos poco variables en el tiempo, especialmente en vivienda, es razonable utilizar sistemas estructurales de paredes resistentes, puesto que se aprovecha la capacidad mecánica de los elementos divisorios y de cerramiento. No obstante, la diferencia de técnica constructiva entre las divisiones verticales y las horizontales plantea dificultades organizativas.

En edificios de pisos las exigencias mecánicas no pueden ser cumplidas por elementos de delimitación y cerramiento inespecíficos debido a la mayor exigencia de flexibilidad.

Vivimos una época de cambio en la que las decisiones se adoptan de forma intuitiva. Carecemos de experiencia suficiente sobre el comportamiento de las nuevas formas de actuar y no se han desarrollado herramientas y estrategias contrastadas para determinar los comportamientos globales durante la vida del edificio. Esta reflexión está relacionada con la consideración ecoeficiente de los cerramientos resistentes, opuesta al criterio general establecido de intentar diferenciar subsistemas edificatorios con objeto de mejorar comportamientos específicos y facilitar el cambio, la sustitución y el reciclaje.



Fig. 34. En edificios de poca altura, con exigencias mecánicas reducidas es cada vez más frecuente la utilización de cerramientos estructurales constituidos por una sola hoja. La mayor dificultad reside en la interacción del sistema de cerramiento con los elementos estructurales horizontales e inclinados. En la fotografía, vivienda realizada con cerramientos estructurales ejecutados con piezas de mortero aligerado.

Existen sistemas de construcción con paredes de hormigón encofrado in situ y de hormigón gunitado que permiten realizar cerramientos y divisiones estructurales de cierta altura. Producen ahorro de material e incluso plazo, aunque producen mayor rigidez espacial. En general son preferibles las que incorporan material aislante en su interior.



Fig. 35. La utilización de sistemas con grandes encofrados desplazables permite obtener ritmos de obra elevados, pérdidas de material escasas y una elevada reutilización de los elementos auxiliares. Encofrados de tipo tunel.

Estos sistemas pueden alcanzar un rendimiento elevado en las tipologías que exigen menor flexibilidad. Una ventaja adicional de estos sistemas es la reciclabilidad del material tras su desmantelamiento.

Las fábricas homogéneas de ladrillo han dado paso a fábricas aligeradas de cerámica, hormigón, residuo de madera conglomerado, poliestireno-hormigón, etc. que suman a una capacidad mecánica ajustada un incremento en el aislamiento térmico. No obstante, su mayor fragilidad y la dificultad para resolver encuentros obligan a una utilización más cuidadosa.

Los sistemas constructivos ligeros de madera alcanzan rendimientos globales elevados por lo que su rango de utilización es muy importante en los países más desarrollados, (EEUU, UE, N. Zelanda, Chile, etc.); sin embargo en España su utilización es todavía anecdótica y la mayor parte de los materiales y elementos se importan, a pesar de contar con materia prima nacional. Los condicionantes culturales, el establecimiento de criterios de valoración basados en la construcción pesada, el menor rendimiento económico producido por la necesidad de importar sistemas completos o desplazar mano de obra, la baja repercusión del costo de construcción en el costo de la vivienda y problemas técnicos, relacionados con la protección contra el fuego y la acción de las termitas, son obstáculos que han dificultado la difusión de sistemas constructivos con gran grado de ecoeficiencia que utilizan fundamentalmente materiales renovables.



Fig. 36. Los cerramientos realizados con bloques conglomerados de residuos de madera reciclada alcanzan elevados rendimientos técnicos y ambientales. Muros realizados con CLIMABLOC.

La utilización de la madera en la construcción ha sido habitual en nuestros pueblos y ciudades hasta tiempos recientes; pero siempre ha estado vinculada a sistemas constructivos mixtos. Quizás la falta de desarrollo de sistemas más próximos a nuestra tradición, y una normativa poco propicia a la utilización de sistemas constructivos de madera sean las causas fundamentales de la escasa utilización de la madera en nuestros edificios, cuando existe una alta valoración de la madera que se observa en la existencia incluso de industrias productoras de falsos

elementos constructivos de madera realizados con materiales plásticos. Es por tanto necesario desarrollar sistemas propios que incorporen como material fundamental la madera.

La construcción moderna se ha caracterizado por la especialización de funciones, de forma que se menosprecian capacidades físicas de los elementos utilizados, aunque es cierto que la especialización produce un aumento del rendimiento.

Las estructuras de edificios de pisos se seguirán realizando preferentemente con hormigón armado ya que en ellos el ratio costo/resistencia es muy favorable respecto al acero, la madera u otros materiales. Además, el desarrollo de encofrados de mayor tamaño y más ligeros ha desequilibrado todavía más la relación.



Fig. 37. Hasta hace pocos decenios la construcción de estructuras de madera respondía a dos tipos fundamentales: los entramados derivados del sistema Platform frame y los blocados de madera enteriza. Actualmente los paneles laminados, CLT, ofrecen una respuesta más simple, eficiente y competitiva respecto a sistemas basados en otros materiales y permiten pensar en un futuro cambio en los paradigmas estructurales.
(http://bruteforcecollaborative.com/wordpress/2011/06/09/a-clt-blog/)

En los últimos años se ha multiplicado la utilización de encofrados no reutilizables, especialmente para elementos vistos. La búsqueda de mejores acabados no debe satisfacerse mediante productos cuyo rendimiento ambiental resulta negativo, sino explorar alternativas que eviten los defectos propios de los ensambles de piezas de los encofrados actuales.

El uso de estructuras de acero en edificios de pisos es recomendable en actuaciones de rehabilitación, estructuras tipológicamente complejas y estructuras de grandes luces, en las que la relación peso/resistencia es determinante. Los elementos estructurales de acero son reutilizables o reciclables al 100% cuando forman parte de estructuras completamente realizadas de acero; el rendimiento disminuye en las estructuras mixtas que sin embargo, tienen un buen rendimiento económico y mecánico.

La utilización en las estructuras "in situ" de hormigón armado de piezas prefabricadas, (viguetas, bloques aligerantes) que presentan altas exigencias de mano de obra darán paso a la utilización de losas realizadas "in situ" y placas y prelosas prefabricadas, que resultan más ecoeficientes y aumentan la seguridad de los trabajadores.

Desde hace varios decenios se utilizan en Estados Unidos y algunos otros países estructuras de piso formadas por placas macizas realizadas "in situ" de hormigón pretensado posteso. La práctica del pretensado permite reducir cantos al controlar mejor la deformación, y mediante el uso de hormigones ligeros de alta resistencia se alcanzan ratios peso-resistencia muy favorables respecto a otras soluciones. La costumbre y la menor importancia del componente "construcción" respecto al componente "suelo" en el coste final del edificio y la necesidad de responder a una fuerte demanda de actividad han hecho que durante los últimos decenios no se hayan producido cambios competitivos notables, que pueden verse favorecidos en otro contexto económico.

4.3. Sistema de cerramiento

4.3.1. El concepto de cerramiento

Por su responsabilidad de actuar como interfaz entre el ambiente interior del edificio y el medio ambiente externo el cerramiento resulta clave para la obtención de un alto rendimiento ambiental y por tanto, para el desarrollo de una arquitectura y una construcción ecoeficientes.

La responsabilidad del cerramiento en la relación del edificio con el exterior radica en que nuestro cuerpo utiliza la piel como principal interfaz con el ambiente climático externo. El cerramiento actúa como una capa adicional más, es un abrigo amplio que permite al cuerpo la movilidad necesaria para desarrollar actividades diversas.

Los seres homeotermos utilizamos la piel para regular la temperatura corporal de forma preferente a otros sistemas internos que exigen un consumo adicional de energía y la dedicación de los órganos correspondientes a ese fin.

La piel es un órgano extenso, activo, multifuncional, interactúa con todos los restantes sistemas funcionales y está presente siempre que existe relación con ambientes externos al organismo. El tejido epitelial no es continuo pero se especializa y adopta características diferenciadas para desarrollar las tareas específicas asignadas a las diferentes partes del cuerpo (dedos, cabeza, pie, intestino, etc.).

La existencia de membranas interfaz activas es común a todos los seres vivos y a sus componentes celulares, no en vano las estructuras más simples, virus, cuentan exclusivamente con la información genética (esencia vital mínima) y una cápsula envolvente multifuncional.

En una escala mayor, observamos que los mayores seres vivos, los árboles, cuya relación con el ambiente exterior es quizás también la más amplia, son prácticamente un epitelio multiforme que engloba los diferentes componentes funcionales.

El edificio eficiente, quizás también inteligente, debe contar con un cerramiento capaz de mantener el desequilibrio entre interior y exterior dentro de los intervalos admitidos para los distintos parámetros ambientales con la menor exigencia de consumo energético interno.

El cumplimiento de lo expuesto en el párrafo anterior se complica en la medida en que aumenta la variabilidad del ambiente exterior, varían los parámetros ambientales internos y las fuentes de energía accesibles, como ocurre en edificios situados en latitudes con climatología muy variable, gran complejidad funcional y sistemas energéticos redundantes, como es el caso de los hospitales. También contribuye a dificultar el problema la subjetividad de la percepción ambiental por las personas, sujetos finales de las acciones ambientales.

Es obvio que el edificio no puede responder con un tipo de cerramiento diferente para cada área ambiental interna diferenciada o a los deseos de cada persona, como tampoco resulta viable normalmente vincular con el cerramiento exclusivamente los espacios con características ambientales análogas; pero la lógica nos debe llevar a pensar que mayores complejidades en los organismos deben corresponderse con mayor complejidad en los sistemas; aunque siempre cabe la posibilidad de explorar nuevas estrategias que modifiquen el organismo para reducir el grado de entropía.[9]

Cabe señalar que los comentarios que se ofrecen en el análisis de los sistemas de aislamiento, protección, control o aprovechamiento energético deben tener en cuenta la posición y orientación de los elementos correspondientes.

4.3.2. *Cerramientos opacos verticales exentos* [13]

Los cerramientos homogéneos de una sola hoja han recuperado parte del campo de actuación con el uso en su fabricación de materiales o elementos con baja conductividad térmica, materiales porosos, fibrosos, alveolares y multiperforados que retienen gran volumen de aire. En ellos las hojas tienen en general que ser revestidas superficialmente por presentar gran absorción de agua líquida y baja resistencia superficial.

El rendimiento en edificios de pisos es inferior a otros sistemas ya que la pérdida de superficie útil debida al aumento de espesor del cerramiento no es compensada por otras ventajas.

La obtención de transmitancias bajas exige utilizar espesores considerables que resultan satisfactorios cuando se utiliza su capacidad estructural. Estos cerramientos deben ser realizados por personal acreditado ya que el tratamiento de encuentros, juntas, huecos y la sujeción de elementos complementarios es delicada ya que en general, los elementos resisten mal las tensiones producidas por acciones no previstas.

La ejecución es rápida y el costo material bajo, por lo que el rendimiento económico es alto.

Los cerramientos formados por una hoja heterogénea de bloques ligeros de material con baja conductividad, poliestireno, fibra de madera, arcilla expandida, etc., rellenos de hormigón presentan características asimilables a los anteriores.

Se aprovechan siempre sus características estructurales, lo que mejora el rendimiento económico; pero reduce la flexibilidad de diseño y modificación posterior.

Necesitan revestimiento, tienen mayor inercia térmica que los anteriores y mantienen la transmitancia baja.

La ejecución resulta más compleja, pero la durabilidad se presume más elevada.

La dificultad de segregar los componentes residuales puede suponer un inconveniente medioambiental importante por la dificultad de reciclado y el carácter inespecífico del residuo.

Estos sistemas no son utilizados habitualmente en edificios de pisos, en los que no es aprovechable su capacidad estructural y el rellenado de la pared interferiría con la ejecución de la estructura del edificio.

Los sistemas formados por una hoja heterogénea con núcleo aislante y revestimiento de hormigón armado (gunitado) se utilizan con aprovechamiento de la capacidad estructural.

El sistema es utilizado para la construcción de edificios de pisos de baja altura en los que las exigencias de rigidez y arriostramiento no son elevadas. La ejecución es sencilla y la durabilidad elevada. No necesita revestimientos, el espesor es pequeño y depende de los parámetros ambientales y mecánicos requeridos.

Mantiene el mismo problema de segregación de residuos que el grupo anterior al que hay que añadir la generación elevada de hormigón residual correspondiente al proceso de gunitado.

Los sistemas formados por una hoja heterogénea ligera, constituida por un núcleo con misión aislante y rigidizadora y revestimientos externos resistentes de madera, metal o material compuesto pétreo con matriz hidráulica o plástica tienen una presencia progresivamente mayor por la rapidez de ejecución y la realización de la mayor parte de las tareas en taller, de forma automatizada.

El avance en su utilización depende exclusivamente del aumento de la aceptación social y del desarrollo industrial del sector ya que la gran variedad de materiales utilizables permite contar con un abanico amplio de precios.

La utilización no es estructural, excepto en algún sistema con láminas exteriores de madera.

Las transmitancias térmicas dependen del espesor del núcleo aislante.

La permeabilidad al vapor depende de las características de los materiales, tanto del núcleo como de las láminas externas.

Son sistemas con baja inercia térmica. La durabilidad es elevada y los residuos generados son en general reciclables, aunque en algunos casos exigen labores específicas de despegado.

Otros sistemas de cerramiento de una hoja: tradicionales de fábrica de ladrillo, adobe, tapial, etc. no se analizan debido a que sus exigencias materiales, temporales, de espacio, transporte y mano de obra han reducido su rendimiento hasta el punto de hacerlos inviables, salvo excepciones, el ámbito urbano; aun cuando pueden tener un

[9] En los seres vivos los tejidos epiteliales se desarrollan a partir de la misma base celular, pero el elevado grado de especialización para satisfacer requerimientos específicos lleva a mutaciones que dificultan incluso en algunos casos la lectura como tejidos asimilables. Del mismo modo, un mismo sistema o elemento constructivo puede expresar diferencias accesorias para responder a exigencias específicas.

campo de utilización amplio en ámbitos rurales de regiones no desarrolladas, al igual que otros sistemas de cerramiento basados en la utilización de fibras vegetales, que tampoco se tratan.

La construcción de cerramientos con hojas destinadas a satisfacer exigencias específicas se ha convertido en el último medio siglo en la tecnología común en nuestro entorno.

A pesar de su utilización extendida, la falta generalizada de conocimiento cierto del comportamiento de estos tipos de cerramientos y la enorme variedad de materiales y técnicas utilizados han llevado a la existencia de un elevado grado de patología constructiva.

La utilización de hojas con tareas específicas permite una mayor adaptación a exigencias y características climáticas diversas, lo que permite mejorar el rendimiento energético y global en edificios con funcionamiento complejo. No obstante, el comportamiento permanente no permite el ajuste a funcionamientos o climas que experimenten variaciones rápidas de curso horario.

La durabilidad y la garantía de comportamiento son muy variadas; reducidas en los sistemas con operaciones de ejecución en obra, mayores en las que utilizan elementos industrializados y prefabricados.

El rendimiento ambiental es también muy variado siendo inferior en los que incorporan más labores manuales en la obra.

Los diversos sistemas pueden ser agrupados en las siguientes categorías basadas en las características de las dos hojas (capas) principales[10]:

- Hojas exterior e interior rígidas.
- Hoja exterior rígida e interior flexible.
- Hoja interior rígida y exterior flexible.
- Hojas exterior e interior flexibles.

Entre ambas hojas existe una cámara de aire que puede estar ocupada por capas aislantes, térmicas y humídicas.

En algunos casos existen revestimientos adheridos sobre las hojas exterior e interior.

Los sistemas con hoja interior rígida plantean más problemas para la modificación o incorporación de sistemas de acondicionamiento y redes de servicios.

Los sistemas con hoja interior rígida y exterior flexible permiten evitar los puentes térmicos[11]; pero se debe garantizar que el aislamiento utilizado y la hoja exterior no permiten la propagación del fuego y que la hoja interior alcanza las exigencias de resistencia y estabilidad en caso de incendio.

4.3.3. *Cerramientos opacos verticales sensibles*

La gestión sensible del cerramiento se ha identificado tradicionalmente con el hueco; aunque algunas soluciones, como los muros Trombe han explorado la posibilidad de establecer una relación térmica entre interior y exterior a través de la parte no hueca del cerramiento.

Una arquitectura ecoeficiente no puede considerar la mayor parte del edificio como una barrera energética "pasiva" cuando resulta receptora del 80-90% de la energía solar incidente y es afectada por un ratio análogo del resto de agentes medioambientales externos.

Los muros Trombe, utilizados desde hace casi un siglo permiten un buen aprovechamiento de la energía solar, aunque la búsqueda de una eficiencia máxima lleva a producir soluciones que ocupan mucho espacio o se integran con dificultad en una arquitectura no experimental.



Fig. 38. La imagen muestra la ejecución de un sistema Trombe en un edificio existente. La solución, mediante una carpintería accesible encarece el sistema; aunque lo hace accesible para tareas de limpieza, mantenimiento y es la más viable para edificios existentes. (*http://www.ison21.es/2009/09/09/el-muro-trombe-diy-gallery/*)

La disminución relativa del costo del vidrio respecto a otros materiales constructivos está dando lugar a construcciones con hoja exterior de vidrio que en la mayor parte de los casos ignoran las posibilidades energéticas y sensoriales del material, que es utilizado exclusivamente por sus propiedades compositivas y plásticas. Ver Fig. 39.

La gestión del aire caliente acumulado en una cámara entre la hoja de vidrio y la hoja interior del cerramiento puede producir un considerable ahorro energético, independientemente del sistema de acumulación de calor diseñado para el edificio.

Los materiales opacos también pueden actuar como intercambiadores térmicos entre interior y exterior.

En algunos proyectos estamos experimentando con las características de los materiales captadores utilizados, así como con el mecanismo intercambiador de la cámara y los sistemas de acumulación y de gestión. Ver Fig. 40.

---

[10] Es habitual clasificar los cerramientos opacos en relación con las láminas u hojas que los componen. Se consideran hojas rígidas (algunos autores prefieren denominarlas pesadas) las constituidas por fábricas aparejadas y encofradas formadas por materiales pétreos y pastas hidráulicas, con espesores que superan los 10 cm. Se consideran ligeras las hojas constituidas por entramados o subestructuras con montantes y travesaños metálicos, de madera o materiales compuestos y capas de poco espesor formadas por materiales compuestos laminados, aglomerados y prensados.

[11] Las hojas rígidas transmiten habitualmente su peso a la estructura apoyándose en las vigas y zunchos de borde de cada planta, por lo que cuando son exteriores resulta muy complejo y caro impedir la transmisión térmica entre aquellas y las vigas y zunchos resistentes.



Fig. 39. La reducción relativa del precio del vidrio respecto a otros materiales está contribuyendo a la ampliación de su campo de utilización a cerramientos opacos, lo que proporciona la oportunidad de aprovechar sus propiedades como captador de energía solar. Viviendas en Vitoria.



Fig. 40. La utilización de cerramientos opacos captadores de energía solar permiten reducir el consumo de energía en períodos fríos hasta en un 10% sin considerar diseños específicos y con un coste que es asumible sin tener en cuenta costes ambientales o análisis de ciclo de vida, por lo que se puede presuponer un campo de utilización creciente. Viviendas realizadas por el estudio del autor en Sarriguren, Navarra.

Su ventaja fundamental es la sencillez del sistema, la existencia de un único intercambiador y la proximidad entre la captación y el uso, que disminuye las pérdidas de energía durante el transporte de la energía.

Respecto a los elementos de acumulación, es preciso estudiar la coordinación de la cesión de calor con el régimen de funcionamiento de los espacios, ya que es habitual construir costosas hojas de fábrica con una ocupación considerable de espacio, que producen desfases en la transmisión térmica sin aprovechamiento efectivo[12] e ignoran la masa térmica que tienen en nuestras construcciones los restantes elementos constructivos, especialmente los estructurales y delimitadores interiores.

Existen iniciativas para utilizar como hoja exterior del cerramiento paneles solares térmicos con circuito líquido. Aun cuando el rendimiento resulte inferior al de los paneles inclinados colocados en la cubierta permite aprovechar una energía actualmente desaprovechada. La ventaja fundamental de este sistema es la posibilidad de acumulación de calor independiente del cerramiento, que permite un aprovechamiento discrecional en cuanto a tiempo y usos.

Las crecientes exigencias ambientales, especialmente el protocolo de Kioto, han supuesto para las factorías europeas limitaciones en el consumo energético, que han obligado a vincular el crecimiento de la producción con la recuperación de la energía residual, fundamentalmente en forma de calor.

Los edificios, grandes consumidores de calor, deben mejorar su aprovechamiento energético evitando perder eficiencia energética a través del vertido de fluidos calentados o refrigerados, para lo cual hay que desarrollar sistemas intercambiadores eficientes para gradientes térmicos pequeños.

4.3.4. Cerramientos verticales contra el terreno. Muros de sótano

La masa necesaria para que los muros actúen como elemento de contención del terreno y la contigüidad con éste proporcionan a aquellos una estabilidad térmica elevada con un rango de temperaturas próximo a la temperatura media anual.

Las importantes diferencias climáticas entre la costa (clima oceánico) y el interior (clima continental), las debidas a la altitud, latitud y orografía general y del entorno producen microclimas muy diferenciados, con variaciones de temperatura importantes en áreas relativamente próximas. Algo similar ocurre con la humedad ambiental, en la que influye además la profundidad y variabilidad del nivel freático.

La respuesta de estos cerramientos debe ser diferente atendiendo a estas especificidades y la variedad funcional de los espacios albergados. La permanencia de los cerramientos contra el terreno por debajo de la temperatura de confort humana y la enorme capacidad de almacenamiento de calor del sistema contención-terreno persuaden de la capacidad de utilizar el cerramiento contra el terreno como batería de enfriamiento de un sistema intercambiador térmico.

El trasdosado interior de los muros de sótano depende del uso que se pretenda dar al sótano y la periodicidad del uso. Con uso permanente y continuo la inercia del muro ofrece una acción reguladora y estabilizadora muy

[12] Los elementos acumuladores resultan eficientes cuando la energía accede directamente a ellos desde el medio transmisor, por lo que las hojas de fábrica u otros elementos constructivos aislados de la radiación solar directa no pueden alcanzar rendimientos superiores a las de elementos que están aislados del ambiente exterior por capas que permiten el paso de la radiación solar (muros solares, Trombe, parietodinámicos, o simples forjados interiores aislados por cristaleras que permiten su irradiación).

adecuada. Si el uso es permanente, pero periódico (ej.: fin de semana) es recomendable trasdosar con una hoja ligera poco absorbente de radiación con objeto de evitar el efecto de pared fría ya que la temperatura del muro será siempre inferior a la de confort. Si se pretende utilizar de forma continua en períodos estacionales calurosos no se deberá trasdosar para obtener ventajas del efecto de pared fría, aunque habrá que cuidar que no se produzcan condensaciones controlando la humedad ambiental.

El cerramiento de sótano utiliza los muros de contención, a los que se añaden capas u hojas para adecuar el comportamiento del muro a las condiciones específicas.

La penetración generalizada de agua a través del muro no es posible con una ejecución adecuada. Las penetraciones puntuales se resuelven mediante sellado o drenaje específico.

El aumento de las exigencias de aseguramiento contra filtraciones de agua y la desconfianza respecto a la ejecución del cerramiento conducen en ocasiones a la acumulación de capas drenantes e impermeables destinadas a evitar el paso del agua, que pueden simplificarse mediante una ejecución rigurosa y controlada.

La cara exterior del cerramiento de sótano puede utilizarse como soporte de circuitos de intercambio que permitan por su geometría actuar como elementos drenantes.



Fig. 41. Los cerramientos con el terreno tienen una elevada estabilidad térmica que puede ser utilizada para compensar las variaciones térmicas de la parte del edificio en contacto con el ambiente exterior. Aunque se han probado diferentes sistemas, todavía no existen protocolos y procedimientos reconocidos para su utilización eficiente.

4.3.5. Cerramientos inclinados opacos expuestos. Cubiertas inclinadas

Las cubiertas inclinadas deben su existencia a la idoneidad para evacuar el agua pluvial y de deshielo y sus diversas tecnologías responden a la necesidad de resolver recogida, canalización y evacuación de agua mediante elementos discontinuos.

Las tecnologías de cubrición están íntimamente ligadas al material de cobertura: resistencia mecánica, rigidez, densidad, rugosidad, conductividad térmica, absortancia, etc. que determinan el tamaño de las piezas, la forma, las longitudes de solape lateral y frontal y la forma de sujeción.

Sin considerar los aspectos ambientales relacionados con la cultura, la solución técnica más idónea corresponde al uso de cobertura de chapa metálica. (De hecho en los países tropicales y subtropicales, en los que son prioritarias la ventilación y la estanqueidad al agua sobre la estanqueidad al aire, constituye la solución más utilizada).



Fig. 42. En las regiones tropicales son habituales las cubiertas ligeras con cobertura exterior metálica y espacio ventilado entre ésta y la hoja interior del cerramiento. La imagen corresponde al edificio del actual Museo de la Diversidad en Ciudad de Panamá. El nuevo edificio, de Frank Gehry.

La vinculación de la exigencia de evacuación con las restantes como cerramiento opaco y la posibilidad de resolver el cerramiento con hojas situadas en dos planos concurrentes, inclinado y horizontal producen variaciones importantes en los cerramientos de cubierta inclinados.

Las cubiertas inclinadas en las que el espacio bajo el faldón está habitado, o tiene algún uso que requiere una variación térmica moderada, presentan características asimilables a los cerramientos de dos hojas con la interior rígida o flexible y la exterior flexible.

El mayor grado de exposición a la radiación solar y al viento agudizan los efectos comentados para los cerramientos verticales.

Cuando la instalación de elementos captadores integrados en los faldones se realiza sobre coberturas discontinuas se deben minimizar las juntas debido a la imposibilidad de mantenimiento o reparación sin desmontar el sistema.

La utilización de los faldones para la captación indirecta de energía resulta interesante por su mayor grado de exposición pero compleja por las dificultades de anclaje de elementos, que deben atravesar el material de cobertura, y de mantenimiento, debido a la dificultad de realizar cualquier tipo de operación sobre superficies inclinadas.

La instalación de elementos captadores superficiales integrados en el faldón debe corresponderse con coberturas mediante membranas.

Algunas tipologías, como las cubiertas en diente de sierra permiten una gestión eficaz de la radiación y el viento si gozan de una orientación adecuada. Se necesita un sistema forzado de convección para hacer descender el aire caliente.

Las cubiertas inclinadas que cuentan con una hoja exterior inclinada y otra interior horizontal permiten una mayor variedad de soluciones con las que responder a las exigencias determinadas por la actividad que albergan los espacios inferiores.

La hoja exterior puede ser ligera o pesada, térmicamente aislante o captadora. La cobertura es normalmente discontinua.

Del mismo modo la hoja interior puede ser pesada o ligera, aislante o transmisora, continua o discontinua y el espacio entre ambas puede contar con una ventilación libre y generosa o escasa y controlada.

La utilización de hojas exteriores captadoras de la radiación solar y de un sistema de gestión del aire comprendido en el espacio de la cubierta permite el aprovechamiento de una energía habitualmente desperdiciada. En edificios extensos o con pocas plantas la radiación incidente sobre la cubierta es superior a la recibida por las fachadas orientadas al sur.

La utilización de un sistema de actuación mecánico exige la continuidad de la hoja interior horizontal y su aislamiento.

El carácter pesado o ligero de las hojas debe ser determinado en cada caso concreto según las condiciones climáticas y de actividad específicas.

La utilización de las cubiertas como captadores energéticos o soporte de ellos exige evitar los elementos que produzcan sombreamiento, casetones, chimeneas de humos y ventilación, otras cubiertas, etc., por lo que algunos sistemas edificatorios pueden verse afectados y exigir soluciones alternativas.

4.3.6. Cerramientos horizontales expuestos. Cubiertas planas, azoteas

Las cubiertas planas se caracterizan por la existencia de una membrana continua que garantiza la estanqueidad del cerramiento ante la lluvia o el deshielo.

Las posibilidades constructivas de las cubiertas planas pueden considerarse asimilables a las de las cubiertas inclinadas, excepto por la necesidad de contar con la membrana continua mencionada; sin embargo, la evolución de las cubiertas planas ha buscado la mejora de su rendimiento económico en la utilización de una única hoja interior.

Se utilizan preferentemente dos soluciones:

- Cubiertas planas con la lámina impermeable situada sobre el soporte rígido y protegida por sucesivas capas superiores.
- Cubiertas planas en las que la lámina impermeable ocupa la posición superior y protege las capas inferiores.

Las primeras se corresponden habitualmente con hojas estructurales de hormigón armado, edificios regidos en propiedad horizontal y en muchos casos transitables o utilizables.

Las segundas se corresponden con estructuras de cubiertas ligeras metálicas, de edificios con un único propietario, no transitables.

No obstante, en tiempos precedentes se utilizaron con notable éxito sistemas con dos hojas, (cubiertas a la catalana) que no llegaron a evolucionar debido al desinterés hacia el aprovechamiento directo de la energía radiante.

4.3.7. Sistemas constructivos para cubiertas planas

Los sistemas que utilizan la lámina impermeable en la posición inferior tienen una gran popularidad debido a la sencillez del sistema y la mayor durabilidad de la lámina, protegida por el aislamiento térmico y la capa superior de acabado superficial. La reparación es así mismo sencilla por estar las capas superiores sueltas.

Estos sistemas tienen un rendimiento óptimo cuando la cubierta sirve de soporte a elementos pesados que no exigen anclaje a la estructura portante, ya que se evita traspasar la lámina impermeable. La situación es todavía más favorable si dichos elementos son instalables en la fase de ejecución del edificio.

Los sistemas con lámina impermeable expuesta se utilizan preferentemente en cubiertas ligeras con soporte de chapa, en las que la capa aislante térmica permite obtener la superficie plana necesaria para apoyar la lámina.

El costo económico es menor, permite la utilización de aislantes térmicos de fibra y el mantenimiento es sencillo ya que la lámina es visible en toda su superficie.

La durabilidad queda reducida por la exposición a los agentes atmosféricos y la radiación solar.

No se pueden situar elementos directamente sobre la lámina impermeable, por lo que todo objeto situado sobre la cubierta debe tener un sistema de sustentación que la atraviese hasta alcanzar la estructura portante.

Las cubiertas de doble hoja permiten captar la energía solar y gestionar su utilización en el edificio.

La posición del sistema captador en la cota superior del edificio obliga a utilizar un sistema de convección forzado cuyas características dependen de las del edificio.

Estos sistemas resultan óptimos en edificios con gran superficie y poca altura, especialmente en los de una sola planta (edificios industriales, comerciales, deportivos, etc.).

Las cubiertas de agua, cubiertas ajardinadas y cubiertas aljibe constituyen casos particulares de cubiertas planas que se caracterizan por la presencia permanente de agua

almacenada. El agua aumenta la inercia térmica del cerramiento; pero su peso implica un aumento de las exigencias mecánicas, que puede ser importante si las luces son amplias. En las cubiertas ajardinadas y las cubiertas aljibe, también ajardinadas, se obtienen ventajas ambientales derivadas de la utilización de vegetación: reducción de la temperatura superficial, reducción del efecto "isla de calor" y reducción de emisiones de CO^2.



Fig. 43. En los ambientes urbanos, cuyas condiciones ambientales resultan afectadas por un metabolismo energético y de recursos muy desequilibrado la generalización de la utilización de cubiertas verdes podría contribuir a la ruptura de la espiral de aumento de demanda. En la imagen la cubierta del museo de la Academy of Science de California, de Renzo Piano.

4.3.8. Sistemas horizontales contra el terreno. Soleras y suelos ventilados.

Las condiciones ambientales internas y externas que afectan a los cerramientos horizontales con el terreno no difieren en gran medida de las correspondientes a los cerramientos verticales contra el terreno, por lo que las soluciones son similares, excluyendo los aspectos que afectan a su comportamiento mecánico.

Existe un temor generalizado a la infiltración de agua a través de este tipo de cerramientos que no se corresponde con el riesgo real y que da lugar a soluciones irracionales con rendimientos materiales y económicos pésimos.

En un cerramiento horizontal contra el terreno sólo se debe considerar la presencia de agua exterior en contacto con él cuando el nivel freático está situado en una cota superior y no es económica o técnicamente posible confinar las capas permeables inferiores en un recinto (con el uso de pantallas que alcancen estratos impermeables) en el que se pueda reducir el nivel freático mediante el uso de sistemas de bombeo con potencias considerables como normales.

Si se produce el caso expresado será necesaria una placa estructural para resistir el empuje (presión) del agua, que si no tiene suficiente impermeabilidad se deberá complementar con una lámina impermeable que se prolongará también en los cerramientos verticales.

En cualquier otro caso el cerramiento estará formado por una base drenante que actúa simultáneamente como capa distribuidora de cargas y una solera cuyos espesores dependen del uso interior y las características de los materiales constructivos utilizados. Las capas interiores, como en el caso de los cerramientos verticales, dependen del tipo de utilización; aunque en este caso hay que atender a la necesidad de transmitir cargas, correspondiente a su misión como cerramiento horizontal.

Los cerramientos horizontales con el terreno son susceptibles de albergar conducciones de sistemas de climatización que aprovechen la inercia térmica del terreno.



Fig. 44. La utilización de los cerramientos horizontales con el terreno para almacenar calor constituye una opción real. No obstante deben considerarse los inconvenientes de integrar y vincular sistemas cuya vida útil puede resultar muy dispar y en su caso establecer procedimientos para la rehabilitación o sustitución de los sistemas dañados u obsoletos. Redes de conductos integrados en una placa de cimiento.

4.3.9. Sistema de delimitación espacial

• *Conceptos. Exigencias*

Los sistemas de delimitación interior de un edificio han evolucionado desde los iniciales sistemas resistentes, pesados y permanentes hacia sistemas específicos ligeros y mutables. Su fin último es conseguir espacios con usos y características específicos en los que desarrollar actividades diversas y consecuentemente la variedad de las soluciones está determinada por ellas. Es fundamental entender que las exigencias ambientales resultan determinantes para la caracterización de los sistemas.

• *Evolución, tipologías, actualización de los sistemas no industrializados, sistemas parcialmente industrializados*

Los sistemas de delimitación han derivado de dos tipos básicos, el grávido, pétreo y húmedo, y el ligero, embarrado y seco. En sus modos más próximos se basan en fábricas y forjados realizados con conglomerantes y piezas diversas pétreas y en entramados formados con barras ligeras metálicas o de madera y rellenos y aplacados ligeros diversos.

Aunque los originaron culturas diferentes e incluso distantes, la globalización del conocimiento, del comportamiento y de los medios ha dado lugar a la homogeneización, generalización y especialización de las soluciones.

• *Relación con otros sistemas*

Los sistemas de delimitación cuentan con elementos vinculados a otros sistemas edificatorios, componentes poli-funcionales, que dificultan su legibilidad y análisis [2].

Si bien dicha propiedad produce aumento de rendimiento global no es fácil conseguir ratios homólogos para las distintas funciones del mismo, hecho que obliga a asumir el menor rendimiento o a complementarlos aumentando la complejidad.

Es habitual que las ineficiencias de los sistemas delimitadores con componentes poli-funcionales se suplan con soluciones redundantes o mediante el sobredimensionamiento de sistemas activos, con aumento en ambos casos del consumo de materiales y energía. La respuesta en todos los casos debe ser el estudio específico de los comportamientos y su optimización, para los que existen cada vez más herramientas de evaluación, modelización y simulación.



Fig. 45. El edificio del Centro Georges Pompidou en París constituye uno de los casos más conocidos de interacción entre sistemas constructivos. Esta interacción es especialmente explícita debido a la utilización expresiva de todos los sistemas edificatorios. Esta interacción, inicialmente positiva y didáctica exigió el cierre del edificio durante 3 años para su rehabilitación tras 23 años de actividad. Vista de encuentro entre techo y cerramiento vidriado que permite observar la interacción de sistemas.

La participación de los sistemas de delimitación en el epitelio de los espacios edificados da lugar a múltiples interferencias con elementos correspondientes a otros sistemas, especialmente los ambientales y de servicios, activos.

La mejora de la eficiencia de los sistemas de delimitación en los encuentros con otros sistemas es fundamental para garantizar su eficiencia global y la solución a los problemas que se plantean está vinculada a una correcta determinación de las interacciones y a la utilización de juntas específicas. Gran parte de los problemas radican en no adoptar medidas específicas en los puntos en los que los comportamientos difieren respecto al caso común.



Fig. 46. Los sistemas tradicionales de delimitación presentan grandes dificultades para resolver la interacción con sistemas de servicios cada vez más ubicuos. Imagen de elemento de delimitación desaparecido en el área de interacción.

• *La delimitación y el ambiente*

Los elementos delimitadores son actores fundamentales en la producción del ambiente espacial por su extensión, la relación directa con el usuario y la capacidad de albergar otros sistemas.

La percepción de temperatura del usuario depende casi en un 50% de las temperaturas de los elementos delimitadores. La sensación producida por un sonido puede ser modificada y modulada mediante las características de

los elementos delimitadores. Cada vez se da más importancia en la calidad de los ambientes interiores a contar con iluminación natural, lo que traslada a los elementos delimitadores la exigencia de transparencia. Las percepciones táctil y de orientación son inherentes al propio sistema de delimitación.

Desde que los elementos delimitadores perdieron la misión estructural se han convertido casi en algo indeseado, una exigencia circunstancial o temporal que reduce o limita las posibilidades del espacio total, elementos "flexibles" en el sentido de eliminables.

Es verdad que en nuestra época los cambios se producen con mayor rapidez que en el pasado; pero también lo es que nuestras exigencias ambientales son incomparablemente más elevadas que las de aquellos tiempos, por lo que aun entendiendo la necesidad de mayor flexibilidad, los sistemas deben estar diseñados para adecuarse a ese entorno cambiante y para producir tras cada cambio el ambiente idóneo deseado [5].

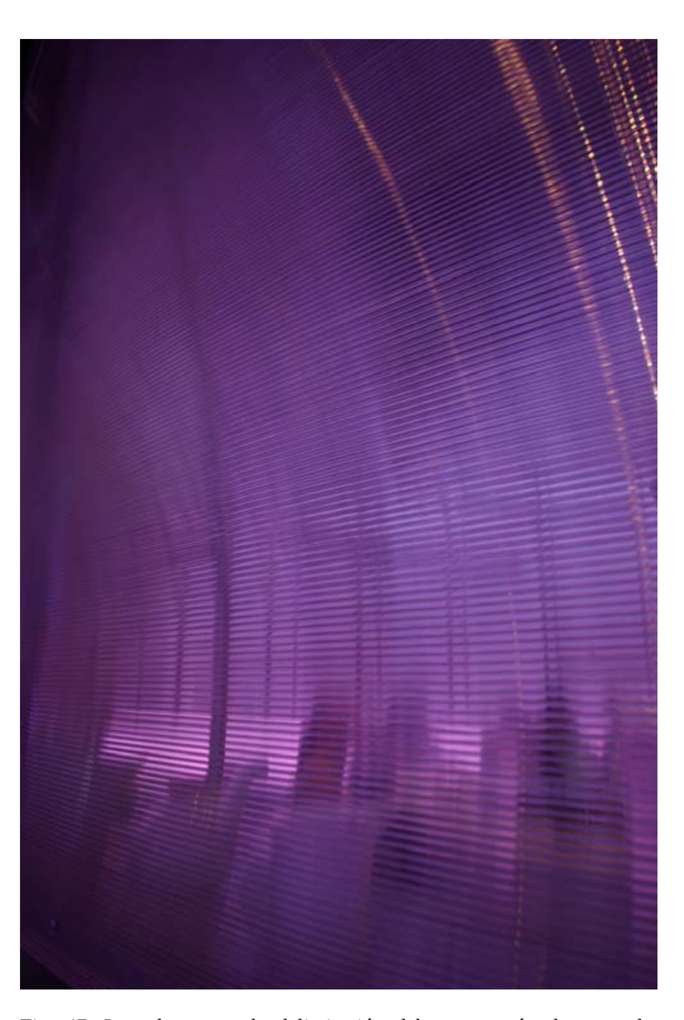


Fig. 47. Los elementos de delimitación deben su razón de ser a las exigencias ambientales y de privacidad. Cuando las primeras no obligan a la segregación y las segundas no existen o tienen un rango muy bajo los elementos de delimitación pueden llegar a desaparecer o convertirse en elementos simbólicos. En la imagen, delimitación espacial de policarbonato en un área de relación.

• *Sistema de acondicionamiento ambiental*

La diferencia esencial entre los vegetales y los animales radica en la capacidad para desplazarse, acción que exige aprovechar reacciones bioquímicas (metabolismo) para producir la energía mecánica necesaria.

Los hechos de que la existencia de una reacción bioquímica implique la intervención de energía capaz de inducirla y de que la velocidad esté regulada por la cantidad de energía interviniente y la temperatura ambiental (energía calorífica del medio) tienen como consecuencia que el desarrollo biológico dependa del nivel de ésta. Por ello no debe extrañarnos que los ambientes más cálidos sean más ricos biológicamente en tanto en cuanto no se superen los límites fisiológicos del material biológico.

El desarrollo biológico superior complejo exige además contar con fuentes de calor autónomas, independientes del ambiente exterior, que permitan la supervivencia en un entorno competitivo en el que el estatismo de las especies sólo es posible mediante estrategias simples y extraordinariamente numerosas de multiplicación, como se dan en los vegetales.

Los animales sólo han podido ocupar regiones ambientales frías aislándose mediante espesas pieles lanudas que permiten dedicar al mantenimiento de la temperatura corporal la menor cantidad del calor producido por sus mecanismos metabólicos internos.

El ser humano, carente de un pelaje adecuado, pero dotado de una inteligencia superior, optó por recubrirse con pieles ajenas y guarecerse en espacios que mantiene caldeados mediante aportaciones energéticas.

Aunque el cerramiento debe adoptarse como primer interfaz energético activo, siempre serán necesarios recursos adicionales para mantener la temperatura interior del edificio entre los parámetros térmicos adecuados.

Estos recursos deben corresponderse con el clima y mantener el ambiente interno en el estado ambiental más próximo al admisible por la actividad humana que se desarrolla en el edificio. El mantenimiento continuado en el interior de los edificios de condiciones ambientales fijas aumenta el desequilibrio energético con el medio exterior y por lo tanto, el flujo energético entre ambos.

Además, cuanto mayor sea el gradiente ambiental entre el interior y el exterior del edificio mayor es la tensión fisiológica producida en el organismo al pasar de un ambiente al otro y por tanto, aumenta también la susceptibilidad ante lesiones en el interfaz epitelial y agentes patógenos.

Los sistemas de acondicionamiento ambiental deben alcanzar el grado de complejidad requerido por la actividad desarrollada en el edificio [6]. No existen recetas mágicas ni son aceptables actitudes programáticas, hay que atender con lógica a las características de las funciones que se desarrollan en el edificio. Es tan absurdo pensar en un sistema totalmente automatizado para la gestión ambiental de una vivienda normal, como pensar en un sistema doméstico para el control del ambiente de un bloque quirúrgico.

Del mismo modo que resulta inadecuado tratar todos los espacios de forma análoga, independientemente de su función, como desarrollar un sistema de gestión automatizada total en un hospital.

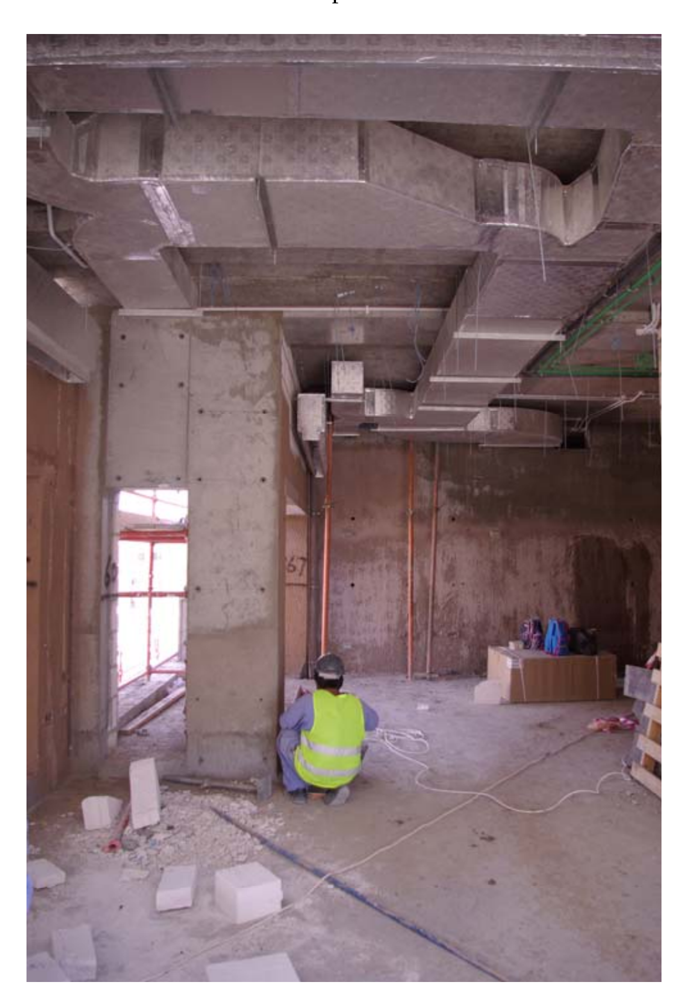


Fig. 48. Los sistemas de acondicionamiento deben adaptarse a cada caso. En la imagen ejecución del sistema de acondicionamiento en una vivienda situada en una región de clima extremado seco.

5. Conclusiones

Estamos acostumbrados a ver en los medios de comunicación, tanto generalistas como especializados, proyectos y edificios que se muestran cual paradigmas de arquitectura ecoeficiente y difícilmente resisten cualquier tipo de evaluación: medioambiental, cultural, funcional, legal, técnica, compositiva, económica y menos aún global.

Se trata en la mayor parte de los casos de propuestas llamativas, "extraordinarias" que se apoyan en la capacidad seductora de las imágenes recreadas artificialmente para suplantar la realidad y en la creencia generalizada de que la técnica es omnipotente y permite alcanzar siempre la eficiencia. Son, sin embargo, en gran parte de los casos artefactos construibles con dificultad y escasamente eficientes.

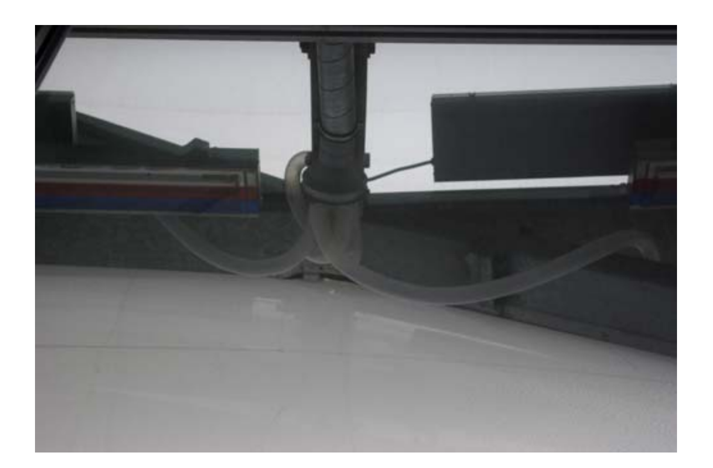


Fig. 49. La innovación tecnológica nos permite en ocasiones resolver los problemas con soluciones anteriormente inexistentes. Sin embargo muchas de ellas no llegan a consolidarse o lo hacen en un ámbito de actividad reducido. En los últimos tiempos se han ejecutado unos cuantos edificios muy llamativos con cerramientos de EFTE. En algunos casos se trataba de cerrar espacios con grandes luces en los que la reducción de peso resulta crítica; pero en otros probablemente se han utilizado por su novedad, sin atender a su ecoeficiencia.

No debemos dejarnos engañar. Los edificios ecoeficientes no exhibirán características ni estarán confeccionados con materiales extraordinarios, serán capaces de convivir en nuestras ciudades sin sobresalir por su extravagancia y evolucionarán siguiendo a la propia sociedad que albergan, porque no puede ser de otro modo ya que responden a sus exigencias. Quizás haya ciudadanos interesados en que su habitación reproduzca el interior de un puesto de mando espacial o el refugio de un héroe del cómic; pero incluso en esos casos el edificio que los albergue será probablemente ecoeficiente ya que esta será una característica común de la edificación futura, exigida por la necesidad de adaptarse a una era cuyos recursos físicos serán menores.



Fig. 50. La edificación ecoeficiente corresponderá en la mayor parte de los casos a edificios poco llamativos realizados mediante hibridación tecnológica. Los edificios icónicos alcanzan hoy día su eficiencia por razón de su valor mediático o socio-político, ya que su ecoeficiencia difícilmente justificaría su coste. En la imagen edificios anónimos realizados con hibridación de tecnologías en un borde urbano de San Francisco.

La edificación ecoeficiente corresponderá a la hibridación de los sistemas que conocemos con otras soluciones que mejorarán algunas de sus prestaciones. Es difícil que se produzcan cambios tecno-morfológicos radicales en la edificación si no cambia su conceptualización como bien de inversión, como refugio económico, por lo que viviremos en un entorno de cambio tecnológico-ambiental imperceptible al que se superpondrán las inquietudes más efímeras de momentos o personas concretas [1].

Glosario

Absortancia: inverso a la reflectancia del material.
Artefacto: cualquier obra manual realizada con un propósito o función técnica específica. En el texto hace referencia a un objeto cuyo fin es su propia existencia.
Ecoeficiencia: el término "ecoeficiencia" fue acuñado por el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) en su publicación del año 1992 "Changing Course". Está basado en el concepto de crear más bienes y servicios utilizando menos recursos y creando menos basura y polución.
Ecocompatible: elemento que no altera el equilibrio del ecosistema en el que se introduce e integra.
Ecosistema: sistema natural que está formado por un conjunto de organismos vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo).
Entropía: medida de la distribución aleatoria de un sistema. En el texto se relaciona con el grado de complejidad.
Gunitado: sistema constructivo consistente en proyectar hormigón con un "cañón", o manguera a alta presión.
Metrobús: sistema de autobús de tránsito rápido (BRT).
Microdifusión: dispersión gradual de un gas en el seno de otro mediante la evaporación de un líquido a partir de la formación gotas micrométricas. En este caso dispersión de agua en el aire.
Muro Trombe: muro o pared orientada al sol, preferentemente al norte en el hemisferio sur y al sur en el hemisferio norte, construida con materiales que puedan acumular calor bajo el efecto de masa térmica (tales como piedra, hormigón, adobe o agua), combinado con un espacio de aire, una lámina de vidrio y ventilaciones formando un colector solar térmico.
Hormigón pretensado posteso: hormigón al que se somete, después del vertido y fraguado, a esfuerzos de compresión por medio de armaduras activas (cables de acero) montadas dentro de vainas.
Rururbano: territorio que originalmente solía ser rural pero que en la actualidad se dedica a usos industriales o urbanos. Los espacios rururbanos tienen un origen reciente, pero son cada vez más frecuentes y muestran que la antigua dicotomía entre el mundo rural y el urbano ya no puede seguir siendo válida para estudiar el poblamiento de un territorio.
Sostenible: desde la perspectiva de la prosperidad humana y según el Informe Brundtland de 1987, la sostenibilidad consiste en satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades.
Torre de vientos: dispositivo arquitectónico de tradición Persa utilizado durante muchos siglos para proveer de ventilación natural y refrescamiento al interior de los edificios
Transmitancia: magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo (potencia).

Bibliografía

[1] Reyner BANHAM. La arquitectura del entorno bien climatizado, Ediciones Infinito, Buenos Aires, 1975.
[2] Richard BENDER, Forrest QUILSON, Ezra EHRENKRANTZ. Una visión de la construcción industrializada, G.G., Barcelona, 1976.
[3] D. BUTTON, B. PYE (Editors). Glass in Building, A guide to Modern Architectural Glass Performance, Pilkington Glass Limited, Londres, 1993.
[4] Klaus DANIELS, Elizabeth SCHWAIGER (tr). The technology of ecological building: basic principles and measures examples and ideas. Birkhauser, Basel, 1994.
[5] Ezra EHRENKRANTZ. Architectural Systems. McGraw-Hill, Nueva York, 1989.
[6] Robert E. FISCHER (ed.). Architectural Engineering. Enviromental Control. McGraw-Hill, Nueva York, 1965.
[7] Helena GRANADOS. Principios y estrategias del diseño bioclimático en la arquitectura y el urbanismo. Eficiencia energética. CSCAE. Madrid, 2006.
[8] Walter GROPIUS. Alcances de la arquitectura integral. Ediciones la Isla, Buenos Aires, 1956.
[9] Charles JENCKS, Architecture 2000 and Beyond, (Critique & new predictions for 1971 book), Academy, Wiley, May 2000.
[11] Alain LIÉBARD, André De Herde. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Observ'ER. París, 2005.
[12] E. MANZINI. Artefactos. Hacia una nueva ecología del ambiente artificial. Celeste Ediciones y Experimenta Ediciones de diseño, Madrid, 1992.
[13] Michael McEVOY. External Components. Longman. N.Y., 1994.





Transmisión de calor en edificios

Heat Transfer in Buildings

José Mª P. Sala Lizarraga [a*]

[a] *Dr. Ing. Industrial y Dr. en Ciencias Físicas. Catedrático. Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos. E. T. S. I. de Bilbao, Universidad del País Vasco*

Resumen

La envolvente de un edificio, formada por muros, ventanas, cubiertas, hace mucho más que contener y encerrar el aire interior acondicionado para los ocupantes del edificio, ya que contribuye de forma muy importante a la carga de calefacción y refrigeración del edificio y en definitiva a su consumo de energía. El calor atraviesa estos elementos, hacia el interior del edificio en verano y hacia el exterior en invierno, dependiendo esos flujos de calor no sólo de la diferencia de temperaturas sino del tipo y calidad del cerramiento.

En este capítulo se pretende cubrir los principios básicos de la transmisión de calor, con el fin de llegar a interpretar el comportamiento térmico de un edificio, tanto de los elementos individuales de su envolvente, como del edificio en su conjunto. Se pretende lograr una comprensión intuitiva de la transmisión del calor, resaltando los argumentos físicos y tratando de presentar de la forma más simple posible los principios básicos, de modo que el lector pueda llegar a formular los problemas más complejos, resolverlos e interpretar los resultados.

Palabras clave: Transmisión del Calor, Conducción, Convección, Radiación, Transporte de Masa, Cargas Térmicas

Abstract

The envelope of a building is made up by walls, windows, roofs, etc. Not only does this envelope contain and enclose the indoor air conditioned for the building occupants, but it also contributes very significantly to the heating and cooling loads of the building and hence to its final energy consumption. The heat transfer through these elements, into the building in summer and outwards in winter, depends on the temperature difference and on the type and quality of the enclosure as well.

This chapter has as a main goal to cover the basic principles of heat transfer, in order to train how to interpret the thermal behavior of a building, both of the individual elements of its envelope, and of the building as a whole. It aims to achieve an intuitive understanding of heat transfer, highlighting the physical arguments and trying to present the basic principles in the simplest possible way, so that the reader can get the capabilities to face the most complex problems, solve them and interpret the results.

Keywords: Heat Transfer, Conduction, Convection, Radiation, Mass Transfer, Thermal Loads

1. Introducción

Este capítulo recoge una introducción a los diversos mecanismos que intervienen en la transmisión de calor en los cerramientos de un edificio. Se inicia el capítulo con unas consideraciones sobre la relación y el diferente planteamiento entre la termodinámica y la transmisión del calor y se recuerda el primer principio de la termodinámica, presentando el balance de energía en sistemas cerrados, sistemas abiertos y finalmente en la superficie de un cerramiento. A continuación se presentan los intercambios de masa en un edificio, bien de aire o de agua. Se hace una somera descripción de los mecanismos que intervienen, así como las consecuencias que tienen estos flujos de masa, tanto en la demanda de energía del edificio como en su mantenimiento.

Se hace después una breve presentación del concepto de ganancias (pérdidas) térmicas de un edificio, distinguiéndolo claramente del concepto de carga térmica. A partir de aquí se define la demanda energética de un edificio y finalmente la energía consumida, concepto en el que hay que tener ya en cuenta los rendimientos de los equipos que integran la instalación energética del edificio.

En el apartado 3 se exponen los fundamentos de la transmisión del calor, es decir, la ciencia que trata la transferencia de energía en forma de calor de un cuerpo a

* josemariapedro.sala@ehu.es

Citar como: Sala Lizarraga, J.M. P. (2012). Transmisión de calor en edificios. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 33 - 62). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

otro, del de temperatura más elevada al de más baja temperatura. Hay dos mecanismos básicos que explican la transferencia del calor, aunque se suelen considerar tres modos de transferencia del calor: conducción, convección y radiación.

Respecto a la conducción, se presenta la ley de Fourier y el significado de la conductividad térmica de los materiales y se introduce, en similitud con la resistencia eléctrica, el concepto de resistencia térmica a la conducción. En lo que respecta a la convección, se expone la ley de Newton, el significado e interés de utilizar los números adimensionales y se define la resistencia a la convección.

Por último, se describe el mecanismo de la radiación térmica. Se define el modelo del emisor ideal o cuerpo negro y la aproximación al comportamiento de las superficies reales mediante el modelo de superficie gris. Se caracteriza el comportamiento de los cuerpos ante la radiación incidente y se hacen una serie de comentarios sobre el efecto invernadero. Se explica el significado de la resistencia térmica a la radiación y se define de temperatura sol-aire. Finalmente, se presentan unas ideas generales sobre radiación solar y radiación atmosférica.

El apartado 4 comienza con unas consideraciones sobre la conducción de calor estacionaria y dinámica. Se presenta a continuación la ecuación general del calor, cuya solución permitirá conocer el campo de temperaturas. Se analiza después el problema de la transmisión de calor en un cerramiento plano, empezando por el caso de una capa y después el de varias. A continuación se define la transmitancia térmica, que es un parámetro fundamental para evaluar el comportamiento de un cerramiento plano en régimen estacionario.

Se hace una breve introducción a la transmisión de calor en coordenadas cilíndricas, ya que son de interés para resolver problemas como el de las pérdidas de calor en una tubería, y se presentan unos breves comentarios sobre el significado de radio crítico. A continuación, se muestran las dificultades que pueden presentarse en la resolución de los problemas bi- o tridimensionales, como es precisamente el caso de los puentes térmicos.

Acto seguido se hace una introducción a los métodos de cálculo del intercambio de calor por radiación entre superficies. Se considera en primer lugar el caso de superficies negras y después se extiende al caso de superficies grises. Se analiza el efecto de los blindajes en la radiación y en concreto, se estudia el efecto de los films reflexivos.

En la parte final del apartado se analizan los mecanismos de transmisión de calor para el caso de vidrios. Se hace el balance de energía en un vidrio y se define la transmitancia térmica del vidrio, así como el factor solar. Finalmente se extienden estos conceptos a las ventanas en su conjunto, exponiendo los métodos de cálculo que se presentan en el C.T.E.

Por último, en el apartado 5 se describen, en primer lugar, los intercambios de calor que tienen lugar en algunos elementos constructivos de especial relevancia y que están basados en una utilización racional de las fuentes y sumideros de calor medioambientales. Se comienza con el muro Trombe y se describen después los flujos de calor en una fachada ventilada acristalada. A continuación se analizan las peculiaridades del comportamiento de una cubierta ajardinada, poniendo de manifiesto la importancia del mecanismo de la evapotranspiración.

Se presenta después un resumen de la forma de calcular la demanda de energía de un edificio, a partir de los balances de energía en las superficies de sus cerramientos y en el aire del local. Por último, el capítulo finaliza con una descripción de los mecanismos de transporte de humedad y su influencia en la demanda de energía y en la vida útil del edificio.

2. La termodinámica y los fenómenos de transporte en edificios

2.1. Termodinámica y transmisión del calor

La termodinámica es la ciencia que estudia los intercambios de energía que experimentan los sistemas cuando tiene lugar un proceso, esto es, cuando pasan de un estado de equilibrio a otro. La termodinámica nos permite evaluar la cantidad de energía intercambiada, pero no nos dice nada sobre el tiempo que tardará el sistema en alcanzar el nuevo estado de equilibrio, es decir, no nos informa sobre la rapidez de esos intercambios de energía.

El objeto de estudio de la termodinámica son los *sistemas termodinámicos*. Un sistema es una región del espacio conteniendo un gran número de moléculas, iones, fotones, etc. Por lo tanto, cualquier objeto macroscópico puede ser considerado un sistema termodinámico.

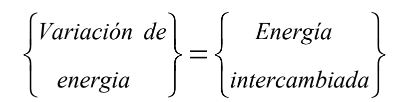
Los sistemas se clasifican en cerrados y abiertos. Un sistema *cerrado* es aquel que no puede intercambiar masa, porque está limitado por una superficie impermeable. Por tanto, su masa es constante, aunque puede intercambiar dos tipos de energía, calor y trabajo. Por el contrario, un sistema *abierto* es el que puede intercambiar masa, por lo que además de calor y trabajo, podrá intercambiar la energía asociada a la masa que atraviesa sus límites.

Aquí estamos interesados particularmente en el calor, que es la forma de energía que se puede intercambiar entre un sistema y otro como consecuencia de la diferencia de temperaturas.

La ciencia que trata sobre las razones de esa transmisión del calor, los tiempos de enfriamiento o de calentamiento, así como la variación de la temperatura es precisamente la transmisión del calor [1].

2.2. Primer principio de la termodinámica

El primer principio de la termodinámica, también conocido como ley de conservación de la energía, establece que en el transcurso de cualquier proceso la energía no se puede crear ni destruir, solamente se transforma de una forma a otra [2]. Por consiguiente, este principio nos conduce a la ecuación del balance siguiente:



2.2.1. Balance de energía para sistemas cerrados

Como sabemos, por definición un *sistema cerrado* tiene una masa constante, por tanto, está limitado por una superficie impermeable. En las aplicaciones que aquí nos interesan, la variación total de energía de estos sistemas va a consistir exclusivamente en la variación de energía interna, que de forma aproximada podemos escribir:

$$\Delta U = m.c_v.\Delta T$$

donde m es la masa del sistema, c_v es el calor específico a volumen constante y ΔT es la variación de temperatura.

Cuando en un proceso solamente existe transferencia de calor y no hay ningún intercambio de trabajo, en ese caso el balance de energía nos lleva a la ecuación:

$$m.c_v.\Delta T = Q$$

Así pues, para un sistema dado, conociendo la variación de temperatura experimentada en el proceso, mediante la ecuación anterior podemos calcular el calor intercambiado.

2.2.2. Balance de energía en sistemas abiertos

En la mayor parte de las aplicaciones de la termodinámica en ingeniería consideramos a los equipos como cajas negras, atravesadas por flujos de fluidos que entran y salen y por flujos de energía en forma de calor y trabajo que se intercambian a través de la superficie que limita al equipo. A este tipo de sistemas se les conoce como *volúmenes de control*.

En la mayoría de las ocasiones los volúmenes de control se analizan en condiciones *estacionarias*, es decir, cuando no se produce ningún cambio en el tiempo. Lo contrario de una situación estacionaria será una situación *transitoria* o *dinámica*.

Pues bien, consideremos a modo de ejemplo el tramo de tubería de la Figura 1. El volumen de control es el fluido que en el instante considerado ocupa dicho tramo, esto es, el fluido contenido dentro de la línea discontinua.

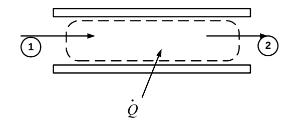


Fig.1. Tramo de tubería como ejemplo de Volumen de Control.

En un sistema abierto existe un trabajo de flujo intercambiado en las secciones de entrada y salida. Este trabajo se puede escribir como $m_i(Pv)_i$ siendo m_i el caudal másico en la sección i y $(pv)_i$ el producto de la presión por el volumen específico del fluido en esa sección [2]. Teniendo en cuenta que existe una variable termodinámica denominada entalpía h, tal que $h = u + pv$, podemos escribir la ecuación del balance de energía en la forma siguiente:

$$\dot{m}.\Delta h = \dot{Q}$$

y aproximadamente:

$$\dot{m}.c_p(T_2 - T_1) = \dot{Q}$$

2.2.3. Balance de energía en una superficie

Por último, vamos a referirnos al balance de energía en una superficie, ya que el cálculo de la demanda de energía en un edificio se basa en los balances de energía en las superficies interiores y exteriores de sus cerramientos.

Por definición, una superficie no tiene volumen ni masa y por tanto tampoco energía. Por lo tanto se puede considerar como un sistema ficticio cuyo contenido en energía permanece constante durante el proceso.

Así, consideremos la superficie interior de un cerramiento vertical, tal como el que se muestra en la Figura 2.

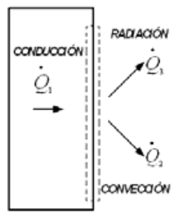


Fig. 2. Flujos de calor en la superficie de un cerramiento.

Un flujo de calor llega a la superficie por un mecanismo (conducción) y sale de la superficie a través de dos mecanismos diferentes (convección y radiación). El balance de energía nos lleva a la ecuación siguiente:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

2.3. Solicitaciones interiores y exteriores

Tanto la envolvente como los elementos interiores de un edificio influyen sobre las diferencias entre el clima que se genera en el interior y el clima exterior. Entre ambos se producen diversos fenómenos de intercambio de flujos energéticos que definen el comportamiento térmico y medioambiental del edificio.

En la térmica de los edificios es muy cómodo utilizar el concepto de sistema que emplea la termodinámica. El edificio es un *sistema* consistente en el volumen de aire, que está limitado por los cerramientos exteriores e interiores, de manera que cada uno de los elementos arquitectónicos (fachadas, cubiertas, soleras, etc.) originan un filtrado del clima exterior hacia el interior del edificio, lo que da lugar a una respuesta térmica global de todo el edificio.

El estado térmico del aire del edificio es el resultado de los diferentes flujos de calor que tiene lugar en el mismo. Estos flujos de calor están provocados por dos tipos de *solicitaciones*, unas *exteriores* y otras interiores al recinto [3]. Entre las primeras se encuentran:

- Radiación solar.
- Temperatura del aire exterior.
- Temperatura de los alrededores.
- Temperatura del cielo.

Las *solicitaciones interiores* proceden del interior del espacio ocupado y comprenden:

- Ocupantes.
- Iluminación.
- Equipamiento de calefacción y climatización.
- Equipamiento diverso.

Estas solicitaciones originan en el recinto los diferentes flujos de calor. Diversos factores arquitectónicos, como la forma, orientación, inclinación de muros, tamaño y ubicación de aperturas, superficies y materiales constituyentes de la envolvente y estructura condicionan el comportamiento del edificio, que en definitiva, actúa como un intermediario con el clima exterior.

2.4. Intercambios de calor en un edificio

Las solicitaciones descritas en el párrafo anterior dan lugar a los diferentes flujos de calor que describimos a continuación.

2.4.1. Superficies en contacto con el aire exterior

- Absorción de radiación de onda corta (procedente del sol). En los cerramientos semitransparentes, parte de esa radiación es transmitida al interior.
- Emisión y absorción (intercambio) de onda larga entre la superficie y los alrededores.
- Convección con el aire ambiente exterior.
- Conducción a través del cerramiento. Esta conducción se suele considerar 1D, salvo en el caso de los puentes térmicos.

En la Figura 3 se presenta un esquema de los diferentes mecanismos de intercambio de calor que intervienen en la superficie exterior de un edificio.

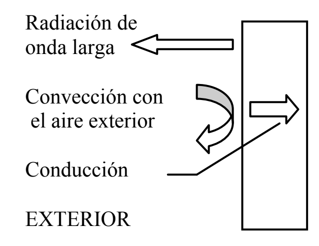


Fig. 3. Mecanismos de intercambios de calor en una superficie exterior.

2.4.2. Superficies en contacto con el aire interior

- Absorción de radiación de onda corta procedente del sol (después de la redistribución) y de la procedente de fuentes internas (iluminación).
- Emisión y absorción de onda larga entre la superficie y los elementos internos y el resto de las superficies del recinto.
- Convección con el aire ambiente interior.
- Conducción a través del cerramiento.

En la Figura 4 se presenta un esquema de los mecanismos que intervienen en el intercambio de calor de una superficie en contacto con el aire interior del edificio.

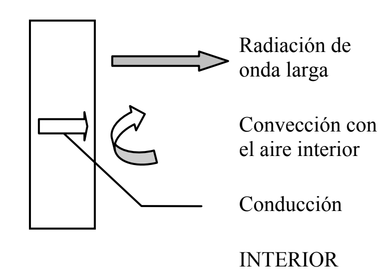


Fig.4. Mecanismos de intercambio de calor en una superficie interior.

2.4.3. Aire interior del edificio.

- Convección con las superficies interiores y los diversos objetos con los que está en contacto.
- Convección con la superficie del equipo de calefacción o acondicionador.

Hay que tener en cuenta que el aire es prácticamente impermeable a los intercambios de radiación para las distancias que podemos considerar en un edificio (decenas de metros), por lo que sólo intercambia calor por convección, ver Figura 5.

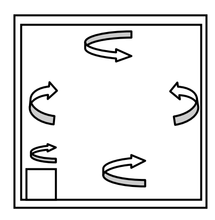


Fig. 5. Intercambio de calor por convección del aire con las superficies interiores.

2.5. Intercambios de masa en un edificio

Un edificio intercambia masa con el exterior debido a los flujos de aire y de agua, a los que nos vamos a referir a continuación.

2.5.1. Intercambios de aire

Toda actividad humana requiere la utilización de oxígeno y genera dióxido de carbono. La *ventilación* adecuada es aquella que suministra el caudal de aire fresco necesario y evita al mismo tiempo la acumulación de dióxido de carbono. Una ventilación insuficiente elimina la sensación de confort térmico dentro del edificio.

Pero además de este caudal de aire controlado y deseado, en un edificio se producen también entradas y salidas de aire no controladas, debidas a la permeabilidad de la envolvente; es lo que se conoce como *infiltraciones.*

La fachada del edificio que mira sobre el viento dominante experimenta una sobrepresión, mientras que en el lado opuesto se genera una depresión. Esta diferencia de presiones origina un flujo de aire, infiltración en una fachada y exfiltración en la opuesta.

Estos intercambios de aire, tanto los debidos a la ventilación como a las infiltraciones, van a representar una fracción muy importante de la energía que habrá que aportar al edificio para mantener las condiciones de confort en su interior.

2.5.2. Intercambios de agua

El aire lleva consigo vapor de agua, por lo que asociado a estos intercambios de aire existe un intercambio de vapor de agua entre el aire del edificio y el aire exterior.

Pero además, puede haber otras causas de intercambio de agua, como la lluvia, condensaciones, ascensión capilar desde el contacto con el terreno, además de las inundaciones y fallos en las conducciones de agua. Existe por otra parte, una producción de humedad por parte de las personas y cierto equipamiento del edificio [4].

La humedad tiene un importante impacto en el rendimiento y en la vida útil de los cerramientos de un edificio. Afecta a la calidad del aire interior y a la salud de los ocupantes. Además, un mal comportamiento frente a la humedad supone un importante incremento en el consumo energético del edificio.

2.6. Demanda térmica y consumo de energía de un edificio

Antes de llegar al concepto de demanda térmica y consumo de energía de un edificio vamos a presentar una serie de conceptos preliminares que resultan necesarios para su comprensión.

Se entiende como *ganancias (pérdidas) térmicas* a los flujos de calor que entran (salen) del volumen de control definido por los límites físicos establecidos. Estas ganancias pueden ser de origen externo, como son:

- Ganancia de calor solar entrante en el espacio a través de ventanas y lucernarios.
- Ganancia de calor por conducción a través de muros, techos, etc., en contacto con el aire exterior.
- Idem. a través de muros y forjados en contacto con el terreno.
- Idem. a través de muros, forjados o particiones en contacto con otros espacios del edificio.
- Ganancia de calor debida a infiltraciones.
- Entre las ganancias de origen interno se encuentran:
- La debida a la ocupación.
- La debida a la iluminación.
- Ganancia de calor debida a equipo diverso.

Los flujos de calor de las ganancias tienen en general dos componentes: una fracción convectiva y otra radiante. La parte convectiva afecta directamente al aire interior de la zona considerada, mientras que la radiante es primero absorbida por los cerramientos que delimitan la zona considerada, para pasar posteriormente por convección al aire.

Pues bien, se entiende como *carga térmica* correspondiente a una zona a la cantidad de calor que hay que suministrar (calefacción) o extraer (refrigeración) para mantener la temperatura y humedad del aire de dicho espacio constante e igual a un valor previamente fijado [5]. La Figura 6 representa esquemáticamente la diferencia entre ganancia y carga.

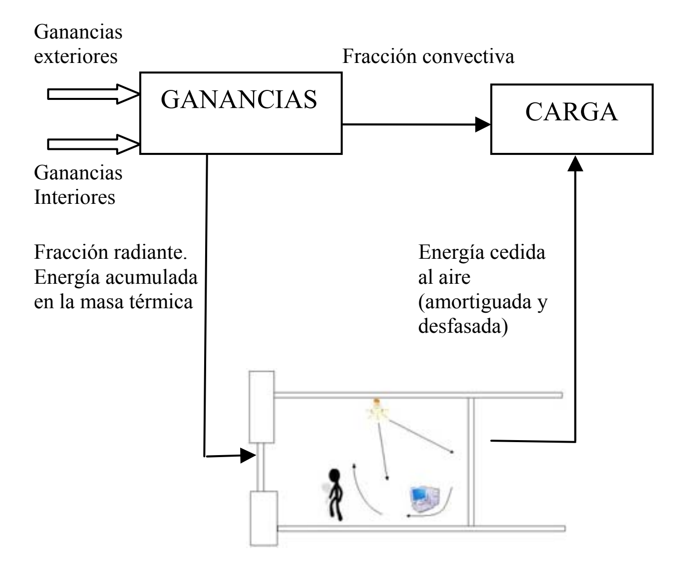


Fig. 6. Diferencia entre ganancia y carga térmica.

Los intercambios de humedad contribuyen de forma importante a los intercambios energéticos del edificio, debido principalmente a los fenómenos asociados de evaporación y condensación. Es lo que se denomina la *carga térmica latente.*

A la integral de las cargas térmicas a lo largo del tiempo, generalmente de un año, se le denomina *demanda térmica* del edificio o de la zona considerada.

Por último, el *calor extraído (añadido)* es la cantidad de calor eliminado (suministrado) realmente por el sistema de climatización. Este valor es diferente de la carga térmica, debido a que la temperatura interior no se mantiene constante por las razones siguientes:

- Paradas intencionadas del equipo de calefacción (noches, fines de semana, periodos de vacaciones.)
- Paradas no intencionadas (porque ya se han alcanzado las condiciones de confort).
- Los sistemas no mantienen una temperatura, sino un rango de temperatura (banda termostática).

2.7. Conclusiones

Este apartado pretende ser una breve introducción al transporte de calor en los edificios. Tras describir las distintas solicitaciones se hace un repaso a los diferentes mecanismos de intercambio de calor en las superficies interiores y exteriores, así como en el aire del edificio.

Por último, pretende también introducir los conceptos esenciales en el dimensionamiento de los equipos de calefacción (climatización), así como en el cálculo de su consumo. Así mismo, se hace una breve introducción a los intercambios de aire y humedad que experimenta un edificio.

3. Mecanismos de transmisión de calor

3. 1. La conducción

La conducción es la transmisión de energía en un medio material como resultado de las interacciones entre las moléculas de ese medio, desde la zona donde tienen una energía media más elevada hacia las zonas adyacentes de menor energía.

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas en su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a las vibraciones de las moléculas y al flujo de los electrones libres.

3.1.1. Ley de Fourier

Consideremos en primer lugar un caso particular, con el fin de comprender más claramente el significado de la ley que rige este mecanismo de transmisión de calor. Sea una pared plana de espesor Δx y área A, siendo la diferencia de temperatura entre un lado y otro de la pared $\Delta T = T_2 - T_1$.

La velocidad de transferencia de calor a través de la pared es proporcional a la diferencia de temperaturas y al área perpendicular a la dirección de la transferencia, y es inversamente proporcional a la distancia en esa dirección, es decir:

$$Q_{cond} \alpha \ A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Llevando al valor límite $\Delta x \rightarrow 0$, la expresión anterior se transforma en la forma diferencial:

$$Q_{cond} \alpha \ A \frac{dT}{dx}$$

La expresión anterior la transformamos en una igualdad, introduciendo un coeficiente k, al que denominaremos *conductividad térmica* del material y que expresa la capacidad del material para conducir el calor. Por tanto, la expresión anterior se convierte en la ecuación:

$$Q_{cond} = -\kappa \ A \frac{dT}{dx}$$

El signo menos aparece porque el calor se conduce en el sentido de la temperatura decreciente y esa derivada de la temperatura en x es negativa cuando el calor es conducido en el sentido positivo de x. Esta expresión se conoce como *la ley de Fourier* para el caso unidimensional, ver Figura 7.

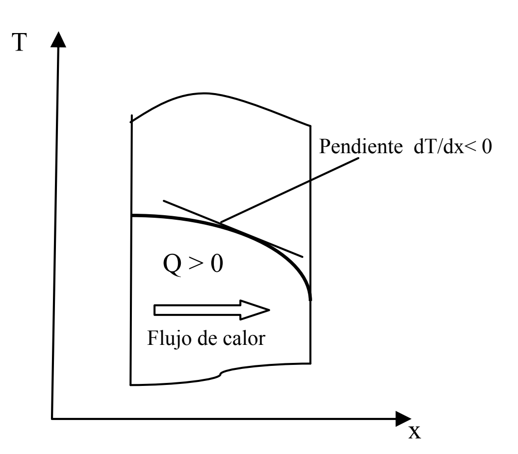


Fig. 7. Gradiente de temperatura y flujo de calor.

Consideremos ahora una situación más general, en la que la distribución de temperaturas es tridimensional. A diferencia de la temperatura, el calor tiene una dirección y sentido, es decir, es una magnitud vectorial. Se define el vector *flujo de calor* como el calor que se transmite por unidad de superficie y unidad de tiempo, esto es:

$$\overline{q} = -\kappa . \overline{\nabla} T$$

donde $\overline{\nabla} T$ es el vector gradiente de temperatura. El vector flujo de calor tendrá tres componentes, en los ejes *x, y, z*, siendo:

$$q_x = -\kappa \frac{\delta T}{\delta x} \qquad q_y = -\kappa \frac{\delta T}{\delta y}$$

$$q_z = -\kappa \frac{\delta T}{\delta z}$$

El flujo de calor a través de una superficie A se obtendrá multiplicando escalarmente el vector flujo de calor por el vector de superficie, que es un vector de módulo *dA* y dirección y sentido la del vector unitario perpendicular a la superficie elemental, e integrando sobre el total de la superficie [6], esto es:

$$Q = \int_A -\kappa . \bar{\nabla} T . d\bar{A}$$

3.1.2. Conductividad térmica

La ecuación que constituye la ley de Fourier también se puede interpretar como la ecuación que define la conductividad térmica. Se puede decir que la conductividad térmica es la transferencia de calor a través de un espesor unitario de ese material por unidad de área y por unidad de diferencia de temperatura.

Un valor elevado de la conductividad indica que el material es un buen conductor del calor, mientras que un valor bajo indica que conduce mal el calor, es decir, es un aislante térmico.

La conductividad térmica varía con la temperatura; para algunos materiales esa variación es despreciable pero en otros es significativa. En la práctica se suele evaluar la conductividad a la temperatura promedio y considerarla como constante en los cálculos.

En la tabla 1 se muestran las conductividades de algunos materiales de interés en la edificación. Se puede apreciar que varían en un amplio rango. Los cristales y metales puros tienen las conductividades más elevadas, en tanto que los gases y los materiales aislantes las más bajas.

Tabla1
Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	*k* (W/m.ºC)
Diamante	2.300
Cobre	401
Aluminio	237
Hierro	80
Vidrio	0,78
Agua	0,61
Fibra de vidrio	0,043
Aire	0,026

3.1.3. Resistencia térmica a la conducción

Consideremos una pared plana, tal como la que se muestra en la Figura 8.

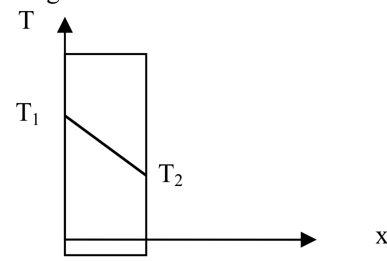


Fig. 8. Distribución de temperaturas en una pared.

Siendo T_1 y T_2 las temperaturas en las superficies de dicha pared, en el próximo apartado veremos que en el caso estacionario en que dichas temperaturas no varíen en el tiempo, la distribución de temperaturas sigue la relación:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L} x$$

donde *L* es el espesor de la pared y *x* es la coordenada perpendicular a las superficies de dicha pared. Aplicando la ley de Fourier se obtiene que el flujo de calor a través de la pared es:

$$\frac{Q}{A} = \kappa \frac{T_1 - T_2}{L}$$

Esta ecuación también la podemos escribir de la siguiente manera:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_2}{L / \kappa}$$

Si comparamos esta expresión con la ley de Ohm de la electricidad podemos establecer una similitud. El flujo de calor lo podemos asimilar a la intensidad de un circuito eléctrico, la diferencia de temperatura a la diferencia de potencial, en tanto que la expresión del denominador *L/k* es equivalente a la resistencia eléctrica. Así pues podemos utilizar este concepto de *resistencia térmica de conducción* por su equivalencia a la resistencia eléctrica de los circuitos eléctricos. Esta analogía es de gran utilidad, como lo veremos en los próximos apartados.

3.2. Transmisión de calor por convección

La convección es un modo de transmisión de calor por conducción, pero donde además hay movimiento. Es el mecanismo de transmisión de calor que tiene lugar entre la superficie de un sólido y un líquido o gas adyacente.

Si no hubiera movimiento en el fluido la transmisión de calor sería por conducción. Evidentemente cuanto más rápido es el movimiento en el fluido mayor es la velocidad de transmisión por convección.

La convección se denomina *natural (o libre)* si el movimiento del fluido es causado exclusivamente por las fuerzas de empuje originadas por la diferencia de densidad en el fluido, debidas a los gradientes de temperatura. Cuando el fluido es forzado a fluir sobre la superficie del sólido por algún medio mecánico, por ejemplo un ventilador, entonces se dice que la convección es *forzada*.

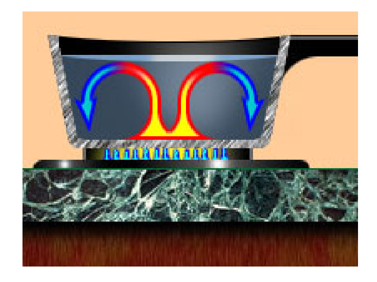


Fig. 9. Convección en el interior de un recipiente.

3.2.1. Ley de Newton

La experiencia pone de manifiesto que la velocidad de transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, como su viscosidad, su conductividad térmica *k*, densidad ρ y calor específico c_p. Depende también de la configuración geométrica, del tipo de superficie y de una forma muy importante del tipo de flujo, es decir, de que éste sea laminar o turbulento.

A pesar de la complejidad del problema, la velocidad de transmisión de calor por convección se puede expresar de una forma sencilla mediante la *ley de Newton*. Dicha ley establece que:

$$Q = A.h.(T_p - T_\infty)$$

donde T_p es la superficie del sólido y T_∞ la del fluido no perturbado (suficientemente alejado del sólido), *A* es la superficie de contacto entre el sólido y fluido a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor y *h* es el *coeficiente de convección*

A pesar de la sencillez de la expresión, la dificultad está en el conocimiento del coeficiente *h,* ya que él engloba la dependencia con la geometría, tipo de fluido, naturaleza del movimiento y temperaturas.

3.2.2. Números adimensionales

Con el fin de reducir el número de variables totales, en los problemas de convección es práctica común quitar las dimensiones a las ecuaciones que rigen el fenómeno (conservación de la masa, de la energía y de la cantidad de movimiento) y combinar las variables, agrupándolas en números adimensionales.

Así aparece el *número de Nusselt*, que adimensionaliza el coeficiente *h*, siendo:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k}$$

donde *k* es la conductividad térmica del fluido y *L* es una longitud característica del fenómeno estudiado. En realidad *Nu* representa la mejora en la transmisión de calor a través de una capa de fluido debido a la convección, respecto a la sola conducción a través de la misma capa.

Cuanto mayor es *Nu* mayor es la convección, de forma que *Nu*=1, representa transmisión de calor sólo por conducción.

Otro número adimensional es el de *Prandtl*, que relaciona la difusividad de la cantidad de movimiento respecto a la difusividad molecular al calor, de forma que describe el espesor relativo de las capas límite térmica y de velocidad.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu . c_p}{\kappa}$$

El calor se difunde con mucha rapidez en los metales ($Pr \ll 1$) y mucho más lentamente en los aceites ($Pr \gg 1$) respecto a la cantidad de movimiento. En los gases $Pr \sim 1$, lo que indica que tanto la cantidad de movimiento como el calor se disipan a través del fluido a la misma velocidad aproximadamente.

El número de *Reynolds* establece la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\rho . V . L}{\mu} = \frac{\rho . L}{\nu}$$

Cuando los valores de *Re* son grandes, las fuerzas viscosas no pueden impedir las fluctuaciones aleatorias y rápidas del fluido, de forma que el movimiento es *turbulento*. Por el contrario, si el *Re* es pequeño, las fuerzas viscosas son capaces de suprimir esas fluctuaciones y el flujo es entonces *laminar*.

Así pues, el flujo de un fluido puede ser laminar o turbulento. Es laminar a bajas velocidades, pero se vuelve turbulento cuando la velocidad aumenta más allá de un valor crítico. La transición de laminar a turbulento tiene lugar en un intervalo de velocidades, en las que el flujo se dice que es de transición. El flujo laminar se encuentra sobre todo en fluidos muy viscosos, cuando fluyen en tuberías de pequeño diámetro.

Por último, el número adimensional que representa los efectos de la convección natural es el de *Grashof*, que representa la relación entre la fuerza de empuje, debida a la variación de densidad del fluido y la fuerza viscosa:

$$Gr = \frac{g . \beta . (T_p - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

donde β es el coeficiente de expansión volumétrica, que refleja la variación de la densidad con la temperatura a presión constante. El producto de *Gr* por el número *Pr* se denomina *número de Ryleigh Ra* [7].

El papel que desempeña *Gr* en la convección natural es similar al de *Re* en la forzada. Así, el coeficiente de convección del aire interior de un edificio con las superficies de los cerramientos interiores suele calcularse mediante expresiones del tipo:

$$Nu = C\left(Gr.Pr\right)^m = C.Ra^m$$

donde *C* y *m* son unas constantes, que se obtienen experimentalmente. En el caso de la convección del aire exterior con las superficies exteriores de la envolvente del edificio, se utilizan expresiones del tipo:

$$Nu = C.Re^{0,8}$$

que conducen finalmente a expresiones de la forma:

$$he = a + b.V^n$$

donde *a,b,n* son unas constantes y *V* es la velocidad del viento.

3.2.3. Resistencia térmica de convección

De la misma manera que hacíamos para la conducción, se puede definir una *resistencia térmica a la convección*. En efecto, volviendo a la expresión de la ley de Newton podemos escribir:

$$\frac{Q}{A} = q = \frac{T_p - T_\infty}{1/h} = \frac{T_p - T_\infty}{R_c}$$

donde expresamos la transmisión de calor por convección a través de una resistencia térmica R_c, que es precisamente la inversa del coeficiente de convección.

3.3. Transmisión de calor por radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Si bien el transporte de calor por conducción o convección requiere de un medio material, la transmisión de calor por radiación no requiere la presencia de la materia. Es la forma en que la energía del sol llega a la tierra.

Las ondas electromagnéticas transportan la energía, propagándose en el vacío a la velocidad de la luz, esto es, c_0 = 2,99979x10^8 m/s. Las ondas se caracterizan por su longitud de onda λ o su frecuencia υ que están relacionadas por:

$$\lambda = \frac{c}{\upsilon}$$

Las ondas electromagnéticas abarcan una amplia gama de longitudes de onda, que van desde 10^{-10} µm para los rayos cósmicos hasta más de 10^{10} µm para las ondas de energía eléctrica. Los diferentes tipos de radiación electromagnética, como los rayos cósmicos, rayos gamma, rayos X, microondas, etc. tienen su origen en diferentes mecanismos.

El tipo de radiación electromagnética asociada a la transmisión de calor por radiación es la *radiación térmica*, emitida como resultado de las transiciones energéticas de los átomos, moléculas y los electrones de una sustancia.

La radiación térmica es emitida en forma continua por toda la materia (con temperatura superior al cero absoluto). Por lo tanto, todos los objetos que nos rodean y nosotros mismos estamos emitiendo y absorbiendo radiación térmica de forma continua, ver Figura 10.

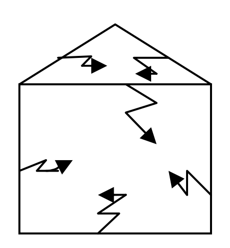


Fig.10. Todos los cuerpos emiten constantemente radiación térmica.

La radiación térmica se define como la parte del espectro comprendida entre 0,1 µm hasta 100 µm, ya que la radiación emitida por los cuerpos cae en ese espectro. La parte visible del espectro, lo que llamamos *luz*, está comprendido entre 0,40 y 0,76 µm. Por lo tanto, la luz no es más que la parte del espectro de radiación que dispara la sensación de visión en el ojo humano.

Un cuerpo que emite radiación en el espectro visible decimos que es una fuente luminosa. El sol es nuestra principal fuente luminosa. A la temperatura ambiente los cuerpos emiten radiación en la denominada región infrarroja del espectro, que comprende entre 0,76 y100 µm. La radiación ultravioleta incluye el extremo de baja longitud de onda y se encuentra entre 0,01 y 0,40 µm. Los cuerpos empiezan a emitir radiación visible por encima de los 800 K.

Es práctica común en los estudios de radiación aplicada a edificios dividir el espectro de radiación en dos grupos: *radiación de onda corta* (≤ 2,5µm) que cubre prácticamente la totalidad de la radiación solar y la *radiación de onda larga* (> 2,5µm) que comprende prácticamente toda la radiación emitida por los cuerpos a la temperatura ambiente.

Dado que los componentes de un edificio no emiten radiación de onda corta, ésta solo puede ser absorbida, reflejada y transmitida. La radiación solar es absorbida y reflejada en el exterior de los cerramientos opacos.

Los cerramientos semitransparentes absorben parte de la radiación solar que les llega y parte la transmiten al interior del edificio. Esta radiación, junto a la fracción radiante de onda corta de las luminarias, es a su vez absorbida y reflejada por los cerramientos opacos. Una parte puede ser transmitida al exterior, a través de los cerramientos semitransparentes.

Los flujos de calor por radiación de onda larga aparecen tanto en las superficies exteriores como interiores del edificio. En las superficies exteriores hay intercambios de radiación de onda larga con la bóveda celeste y con los alrededores. En las superficies interiores hay intercambios radiantes entre cada superficie y las demás, además de con los objetos interiores, como ocupantes y diversos equipos.

3.3.1. Radiación de cuerpo negro

La radiación es un fenómeno volumétrico, aunque para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, se suele considerar como un fenómeno superficial. Esto es debido a que la radiación emitida por las zonas interiores de un material nunca puede llegar a la superficie y por otra parte, la radiación incidente sobre esos cuerpos no penetra más de unas pocas micras hacia el interior del sólido.

Dicho esto resulta curioso conocer la máxima radiación que puede ser emitida por una superficie a una temperatura dada. Ello requiere la definición de un modelo, de un cuerpo idealizado, al que llamamos cuerpo negro.

Un *cuerpo negro* se define como un emisor y absorbedor perfecto de radiación. Por tanto, absorbe toda la radiación incidente y emite la máxima energía de radiación, de manera uniforme en todas las direcciones. La energía emitida por unidad de área y de tiempo fue determinada experimentalmente por J. Stefan, que la expresó como:

$$E_b = \sigma . T^4$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzman, siendo:

$$\sigma = 6{,}668.10^{-8} W / m^2.K$$

y E_b es el denominado *poder de emisión del cuerpo negro*, que es la suma (la integral) de la radiación emitida sobre todas las longitudes de onda, es decir:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T).d\lambda = \sigma . T^4$$

donde $E_{b\lambda}$ es el poder de emisión espectral del cuerpo negro.

3.3.2. Superficie gris y difusa

La radiación es un fenómeno complejo, ya que depende por una parte de la longitud de onda, pero también de la dirección espacial considerada. Suponiendo que existieran datos suficientes, los cálculos serían muy complejos.

Por ello, en los cálculos de radiación en edificios a menudo se utiliza el modelo de superficie gris y difusa. Se dice que una superficie es *difusa* si la radiación emitida es independiente de la dirección y *gris* si es independiente de la longitud de onda.

Se define entonces la *emisividad* de una superficie gris como la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. La emisividad de una superficie se denota por ε y varía entre 0 y 1, $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

La emisividad depende de la sustancia de que se trate, pero en gran medida del estado de la superficie, como su oxidación, aspereza, tipo de acabado y limpieza. Por ello, en muchas ocasiones se tiene bastante incertidumbre en los valores utilizados.

En la Tabla 2 se presentan los rangos típicos de emisividad para diversos materiales de construcción.

Tabla 2
Emisividad de algunos materiales

Material	ε
Pinturas	0,80-0,95
Vidrios	0,75-0,90
Cerámica	0,40-0,80
Metales oxidados	0,25-0,70
Metales pulidos	0,05-0,20

3.3.3. Absortividad, reflectividad y transmisividad

Todo cuerpo recibe radiación procedente de la emisión de otros cuerpos. Vamos ahora a analizar cómo se comportan los cuerpos ante esa radiación incidente.

Cuando la radiación llega a una superficie, parte de ella es absorbida, parte es reflejada y la restante, si la hay se transmite, tal y como se muestra en la Figura 11.

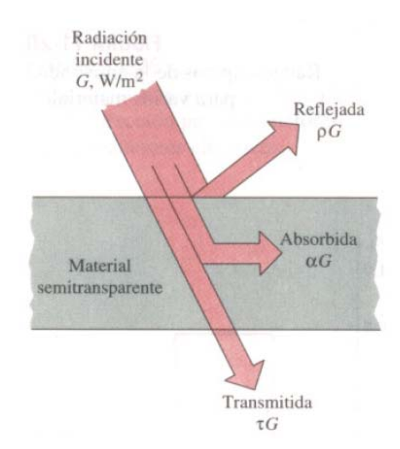


Fig. 11. Comportamiento de un material semitransparente ante la radiación incidente.

El flujo de radiación que incide sobre una superficie se denomina irradiación y lo designaremos por G. Pues bien, se llama *absortividad α* a la fracción de la irradiación absorbida por la superficie, esto es:

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G}$$

Igualmente, la fracción reflejada por la superficie recibe el nombre de *reflectividad ρ*, siendo:

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G}$$

La fracción transmitida es la *transmisividad* τ, siendo:

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G}$$

El primer principio de la termodinámica requiere que la radiación incidente sea igual a la suma de la reflejada más la absorbida más la transmitida y por tanto, se ha de cumplir que:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

En el caso de las superficies opacas, la transmisividad es nula y por ello:

$$\alpha + \rho = 1$$

Esta relación es muy importante, ya que (para una superficie opaca) permite determinar la reflectividad o la absortividad, conociendo la otra propiedad.

Estas propiedades así definidas son en realidad valores promedio, para todas las direcciones y todas las longitudes de onda. Lo mismo que para la emisividad, las propiedades ante la radiación incidente se pueden definir para cada dirección y cada longitud de onda.

La reflectividad tiene en realidad una naturaleza bidireccional, ya que depende no sólo de la radiación incidente sino también de la dirección de la reflexión. En la práctica se suele considerar que las superficies reflejan de una manera especular, es decir, el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, o bien difusa, cuando la radiación se refleja por igual en todas las direcciones.

3.3.4. Ley de Kirchoff

La ley de Kirchoff simplifica mucho los análisis relativos a la radiación. Esta ley establece que la emisividad de una superficie a la temperatura T es igual a su absortividad para radiación procedente de un cuerpo negro a la misma temperatura, es decir:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T)$$

Esta relación junto con la anterior, $\rho = 1\text{-}\alpha$, permite determinar las tres propiedades de una superficie opaca, conociendo sólo una de ellas. Sin embargo, la ley de Kirchoff no puede utilizarse cuando existe una diferencia importante entre la temperatura de la superficie y la de la fuente de radiación incidente [8]. Por ello, se suele distinguir entre absortividad para onda corta y absortividad de onda larga, siendo ésta la que se puede igualar a la emisividad.

En la Tabla 3 se recogen unos valores de absortividad de onda corta α_{oc} y de emisividad ε (igual a la absortividad a onda larga) de algunos materiales de interés.

Tabla 3
Valores de absortividad de onda corta α_{oc} y de emisividad ε

Superficie	α_{oc}	ε
Óxido negro de niquel	0,92	0,08
Hormigón	0,60	0,88
Pintura negra	0,97	70,97
Pintura blanca	0,14	0,93
Aluminio anodizado	0,14	0,84
Nieve	0,28	0,97
Piel humana	0,62	0,97

Como puede apreciarse, el óxido negro de níquel tiene una alta absortividad para la radiación solar, mientras que su emisividad es baja. Por ello será interesante utilizar estas superficies en aquellas aplicaciones en las que interese captar la radiación solar y que esta energía captada no sea emitida; éste es el caso de la superficie de los colectores solares.

Por el contrario, una pintura blanca absorbe poca radiación solar, mientras que su emisividad es elevada. Interesará recubrir con pintura de este color las superficies de las viviendas en climas cálidos.

3.3.5. El efecto invernadero

Consideremos un material como el vidrio blanco. En los espesores típicos en una ventana el vidrio transmite más del 90 % de la radiación en el espectro de longitudes de onda entre 0,3 μm< λ< 3μm, en el que se emite la mayor parte de la radiación solar, incluido el espectro visible. En las regiones del espectro correspondientes a la radiación infrarroja, para λ> 3μm el vidrio es opaco, es decir, no deja pasar esa radiación.

En definitiva, el vidrio deja que entre la radiación solar pero no deja que escape la radiación infrarroja proveniente de las diferentes superficies. Por ello, el aire interior de un recinto limitado por vidrio, como puede ser el interior de un automóvil, se calienta mucho más que el aire del exterior. Este comportamiento del vidrio da lugar a lo que se conoce como *efecto invernadero o trampa de calor*, ver Figura 12.

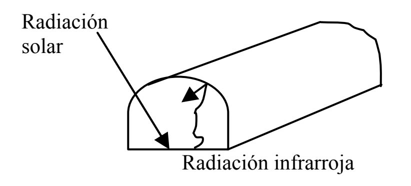


Fig. 12. El efecto invernadero.

Este efecto invernadero se produce a una escala mucho mayor sobre la tierra. La superficie de la tierra absorbe la

radiación solar y se calienta, pero durante la noche emite radiación infrarroja al irradiar energía hacia el espacio. Las nubes absorben parte de esa radiación y la remiten de nuevo, en parte hacia la superficie de la tierra. Eso hace que el enfriamiento sea menor en una noche nublada que cuando el cielo está raso.

Por otra parte la presencia de gases como CO_2, absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, en tanto que transmiten la radiación solar. Así, la energía atrapada sobre la tierra puede causar un calentamiento global y el cambio climático, que es una de las mayores preocupaciones de los tiempos actuales.

3.3.6. Resistencia térmica a la radiación

Hasta ahora hemos definido la resistencia térmica a la conducción y a la convección. De forma análoga podemos definir la resistencia térmica a la radiación.

Consideremos una superficie cuya temperatura superficial es T_p. Esta superficie intercambia calor por radiación con los alrededores, que los podemos considerar como una superficie negra a una temperatura T_{al} y que envuelve a la superficie del cerramiento considerado, ver Figura 13.

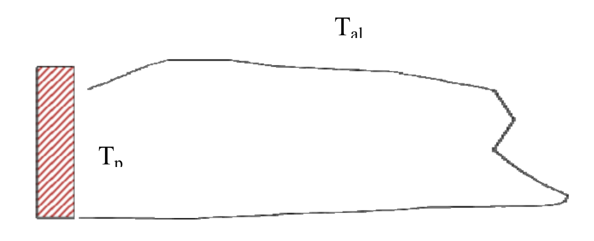


Fig. 13. Superficie gris y alrededores.

El calor intercambiado por radiación entre la superficie del cerramiento y la de los alrededores resulta ser:

$$Q_r = A.\varepsilon.\sigma\left(T_p^{\ 4} - T_{al}^{\ 4}\right)$$

Como podemos observar, el calor intercambiado es proporcional a la diferencia de temperatura de cada superficie elevada a la cuarta potencia. Pues bien, podemos linealizar esta expresión escribiendo aproximadamente:

$$T_p^{\ 4} - T_{al}^{\ 4} = 4T_m^{\ 3}\left(T_p - T_{al}\right)$$

donde T_m es la media aritmética entre T_p y T_{al}. El error relativo de esta aproximación, para los rangos normales de temperatura, resulta menor del 0,1%. Pues bien, sustituyendo esta igualdad aproximada en la expresión del calor intercambiado resulta:

$$Q_r = 4A.\varepsilon.\sigma.T_m^{\ 3}\left(T_p - T_{al}\right)$$

que podemos escribir como:

$$Q_r = A.h_r\left(T_p - T_{al}\right)$$

donde h_r es el coeficiente equivalente de radiación, siendo por tanto $h_r = 4\sigma\varepsilon T_m^{\ 3}$

Por lo tanto, el calor intercambiado por radiación lo podemos escribir:

$$Qr = \frac{T_p - T_{al}}{1/\ h_r} = \frac{T_p - T_{al}}{R_r}$$

donde R_r (la inversa del coeficiente h_r) es la *resistencia térmica a la radiación.*

3.3.7. Resistencia combinada a la convección y radiación

Consideremos la superficie exterior de un cerramiento de temperatura superficial T_s. Además del calor intercambiado por convección con el aire de temperatura T_a hay un calor de radiación intercambiado con los alrededores. Ambos mecanismos los podemos modelar a través de las correspondientes resistencias a la convección R_c y a la radiación R_r, que se han definido en apartados anteriores, ver Figura 14.

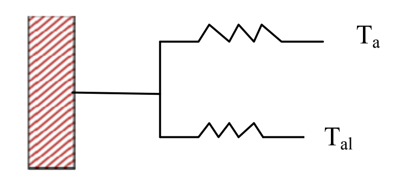


Fig. 14. Resistencias a la convección y radiación.

Las temperaturas T_a y T_{al} en general no diferirán mucho entre sí, por lo que las podemos considerar aproximadamente iguales. Tenemos pues dos resistencias térmicas en paralelo, de manera que la resistencia equivalente es una resistencia tal que:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r}$$

o lo que es lo mismo, podemos definir un coeficiente de convección-radiación equivalente, de modo que:

$$h_{cr} = h_c + h_r$$

siendo $R_s=1/h_{cr}$. En el S.I. las unidades de estos coeficientes son $W/(m^2.°C)$ y por lo tanto la unidad de las resistencias será la inversa.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo actual que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos establecidos en la ley de Ordenación de la Edificación de 1999. Dicho CTE establece unos valores normalizados para estos coeficientes equivalentes de convección-radiación. Así, por ejemplo, para un cerramiento vertical con flujo horizontal establece que para la superficie exterior R_{se} = 0,4 m^2.K/W, mientras que para la superficie interior R_{si} = 0,13. Si el cerramiento es horizontal con flujo ascendente los valores que se deben adoptar son R_{se} = 0,04 y R_{si} = 0,10, en tanto que si el flujo es descendente R_{se} = 0,04 y R_{si} = 0,17 m^2.K/W

3.3.8. Temperatura sol-aire

Consideremos nuevamente la superficie exterior del cerramiento de la Figura 14, que en general estará sometido a la radiación solar. Haciendo un balance de energía sobre la superficie podemos escribir que:

$$\alpha.G + h_{cr}.(T_s - T_a) = q_{cd}$$

donde $\alpha \cdot G$ es la radiación solar absorbida, $h_{cr}(T_s\text{-}T_a)$ es el calor intercambiado por conducción y radiación de onda larga, y q_{cd} es el calor transmitido por conducción a través del cerramiento.

Resulta cómodo agrupar los dos sumandos de la izquierda de la igualdad y definir una temperatura ficticia a la que se denomina *temperatura sol-aire*, T_{sa}, de manera que:

$$\alpha.G + h_{cr}.(T_s - T_a) = h_{cr}.(T_{sa} - T_a)$$

y por tanto:

$$T_{sa} = T_s + \frac{\alpha.G}{h_{cr}}$$

Así pues, mediante esta temperatura ficticia, el balance de energía en la superficie lo podemos escribir de la manera siguiente:

$$h_{cr}(T_{sa} - T_a) = q_{cd}$$

3.4. Radiación solar y atmosférica

3.4.1 Radiación solar

La radiación procedente del sol, que llega a nosotros después de experimentar diferentes interacciones con la atmósfera, la denominamos radiación solar. El sol emite una potencia de radiación de unos $3{,}8 \times 10^{26}$ W. De esta potencia total la que llega a la atmósfera terrestre se denomina *irradiación solar total* o constante solar G_s y su valor es:

$$G_s = 1373 \ W / m^2$$

Esta radiación se puede considerar aproximadamente como la emitida por un cuerpo negro de temperatura superficial efectiva T_{sol} = 5780 K.

La radiación solar es en parte absorbida y en parte dispersada, como consecuencia de su paso a través de la atmósfera. Así el O_2 absorbe radiación en una banda alrededor de λ = 0.76 μm, mientras que el ozono O_3 absorbe la radiación ultravioleta, fundamentalmente en el rango de 0.3-0.4 μm. El vapor de agua y el CO_2 absorben la radiación en la zona del infrarrojo.

Además de la absorción, la radiación solar al pasar a través de la atmósfera experimenta la dispersión o reflexión debida al aire, a las partículas como el polvo y a las gotas de agua en suspensión en la atmósfera. Como resultado, la radiación que llega a la superficie de la tierra en un día claro es de alrededor de 950W/m^2 y mucho menor en los días nublados.

Por ello la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se suele considerar que consta de dos componentes, directa y difusa. Se llama *irradiación solar directa* G_D a la que llega a la superficie de la tierra sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera, mientras *irradiación solar difusa* G_d es la radiación dispersada que llega a la superficie de la tierra.

Llamando θ al ángulo de incidencia (ángulo que forma la radiación con la normal a la superficie) de la radiación solar directa sobre una superficie, se tiene:

$$G_{solar} = G_D.cos\theta + G_d$$

En la Figura 15 se representa la radiación directa y difusa que inciden sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre.

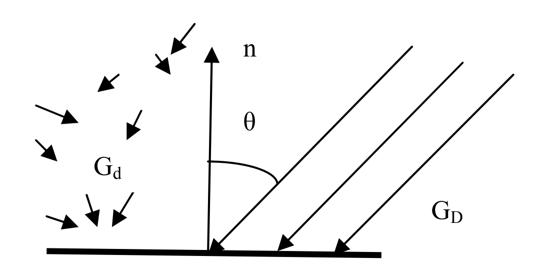


Fig.15. Radiación directa y difusa que inciden sobre una superficie horizontal en la superficie terrestre.

3.4.2. Radiación atmosférica

La radiación emitida o reflejada por los diferentes constituyentes de la atmósfera la denominamos radiación atmosférica. La emisión atmosférica se debe principalmente al CO_2 y al H_2O. Aunque se aleja bastante

de una radiación negra se suele tratar la atmósfera aproximadamente como un cuerpo negro que emite a una temperatura ficticia, que se denomina la temperatura del cielo T_{cielo}. La emisión de la atmósfera hacia la superficie de la tierra es pues:

$$G_{cielo} = \sigma . T_{cielo}^{4}$$

Esta temperatura varía entre 230 K para condiciones de cielo claro y frío hasta alrededor de 285 K para cielo cálido y con nubes.

3.5. Conclusiones

Este apartado presenta las ideas esenciales sobre los mecanismos de transmisión de calor, esto es, la conducción, convección y radiación. Todos ellos requieren una diferencia de temperatura y el flujo de calor es en el sentido de mayor a menos temperatura.

En un sólido opaco sólo puede haber transmisión de calor por conducción, que está regida por la ley de Fourier, mientras que en un sólido semitransparente puede haber conducción y radiación.

En ausencia de radiación la transmisión de calor en un fluido en reposo es por conducción, mientras que en un fluido en movimiento los mecanismos de transmisión de calor son la convección y la radiación. Por tanto, la conducción se puede considerar como un caso particular de la convección cuando no hay movimiento, en tanto que la convección se puede considerar como la conducción y el movimiento del fluido combinados.

El aire es prácticamente transparente a la radiación, de manera que en las distancias que puede haber en un edificio se puede considerar que no interviene en la absorción ni emisión de radiación. Sin embargo la superficie de un cerramiento puede intercambiar calor por convección con el aire y con radiación con otras superficies.

La radiación se suele considerar un fenómeno superficial y para conocer la radiación emitida por una superficie habrá que saber su temperatura y su emisividad. Además habrá que caracterizar el comportamiento de la radiación ante la radiación incidente, para lo que se define la absortividad, reflectividad y transmisividad, que están relacionadas entre sí.

4. Transmisión de calor en cerramientos opacos y semitransparentes

4.1. Consideraciones preliminares

Ya hemos visto en apartados anteriores que si bien la temperatura es una magnitud escalar el calor es vectorial, es decir, no basta con conocer la magnitud del flujo de calor sobre una superficie, sino también su dirección y sentido.

Se necesita por ello trabajar con un sistema de coordenadas e indicar el sentido del flujo con los signos más y menos. Cuando el flujo de calor es en el sentido positivo del eje de coordenadas el flujo es positivo y si es en sentido opuesto entonces es negativo. De ahí el signo negativo que aparecía en la ley de Fourier expuesta en el apartado 3.

La especificación de la temperatura en un punto de un medio necesita en primer lugar determinar la ubicación de ese punto. Para ello se va a utilizar el sistema de coordenadas adecuado, que va a depender de la geometría del problema pudiendo ser coordenadas rectangulares, cilíndricas o esféricas

El mejor sistema de coordenadas para una determinada geometría es el que mejor describe dicha geometría. Así, un paralelepípedo se describe con las coordenadas rectangulares (x,y,z), ya que cada una de sus superficies se describe con un valor constante de la correspondiente coordenada. Sin embargo, una tubería, que es una geometría cilíndrica, se describe mejor en coordenadas cilíndricas, ya que la superficie de la tubería se define entonces con un valor constante del radio.

Además de las coordenadas, otro aspecto a considerar en los problemas de transmisión de calor es su dependencia con el tiempo. Un problema es estacionario cuando nada se modifica en el tiempo, de forma que el campo de temperatura y el flujo de calor son constantes. Por el contrario, si el problema es transitorio ello implica variación con el tiempo.

La mayoría de los problemas de transmisión de calor son de naturaleza transitoria. Así, la transmisión de calor a través de un cerramiento de un edificio no puede ser estacionaria, ya que las condiciones del exterior, como temperatura, velocidad y dirección del viento, irradiación, etc. son variables e igualmente las condiciones en el interior del edificio tampoco son estacionarias. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones se suelen resolver los problemas en régimen estacionario, ya que son mucho más fáciles y suelen proporcionar respuestas aproximadas a las preguntas que formulamos.

4.2. Ecuación general de la conducción del calor

Aunque la mayor parte de los problemas que se presentan en la Térmica de Edificios se pueden considerar como si fueran unidimensionales, hay algunas ocasiones en que es necesario tener en cuenta la transmisión del calor en más de una dimensión, como es el caso de los puentes térmicos, a los que luego nos referiremos.

Vamos pues a presentar la ecuación del calor en el caso general, multidimensional. En este caso, la distribución de temperaturas en el medio, así como el flujo de calor son funciones de tres coordenadas, tales como x,y,z en el sistema de coordenadas rectangulares (cartesiano), o r,φ,z en el sistema de coordenadas cilíndricas

Para calcular el flujo de calor en un punto basta con aplicar la ecuación de Fourier. A continuación, el cálculo del flujo de calor sobre una superficie cualquiera que pasa por el punto se obtiene mediante una integral de superficie del producto escalar de ese flujo de calor por el vector superficie. Por lo tanto, se necesita conocer, además de la conductividad del material, el campo de temperaturas.

Necesitamos por lo tanto una ecuación que nos permita determinar ese campo de temperaturas. Para ello se va a considerar un volumen elemental cualquiera del medio considerado de dimensiones *dx.dy.dz*, ver Figura 16.

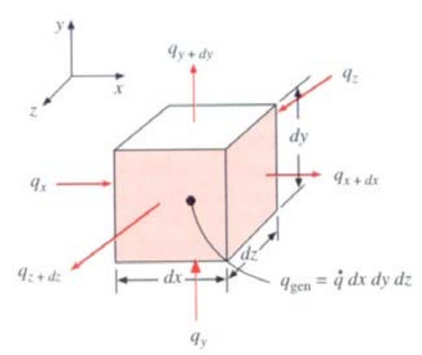


Fig. 16.Volumen elemental.

Haciendo un balance de energía sobre este elemento de volumen podemos escribir la ecuación siguiente:

$$\left\{\begin{matrix} \textit{Energía que entra} \\ \textit{por conducción a} \\ \textit{través de las caras} \end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix} \textit{Energía que sale} \\ \textit{por conducción} \\ \textit{a través de las caras} \end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix} \textit{Calor generado} \\ \textit{en el interior} \end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix} \textit{Variación de la} \\ \textit{energía interna} \end{matrix}\right\}$$

Desarrollando esta ecuación resulta finalmente la ecuación en derivadas parciales siguiente:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta^2 x} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 y} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 z} + \frac{\dot{g}}{\kappa} = \frac{1}{\alpha}\frac{\delta T}{\delta t}$$

donde $\dot{g}$ es la generación de calor por unidad de volumen y tiempo y $\alpha=\kappa/\rho$ es la difusividad térmica del material. Hay diversos problemas en la Térmica de Edificios en los que hay que tener en cuenta la presencia de la producción de calor. Es el caso de la radiación solar absorbida en un vidrio o, por ejemplo, el flujo de calor cedido por un suelo radiante.

En el caso de la conducción de calor a través de una pared plana, se trata de un problema esencialmente unidimensional y siendo *x* la coordenada perpendicular a la pared, y puesto que no hay producción de calor, se tiene:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta^2 x} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$$

Finalmente, en el caso particular de régimen estacionario la ecuación anterior se convierte en:

$$\frac{d^2 T}{d^2 x} = 0$$

4.2.1. Condiciones de frontera y condiciones iniciales

Resolver una ecuación diferencial como es la de conducción del calor es un proceso de eliminar derivadas, o sea, un proceso de integración. Así pues, en la solución general de la ecuación diferencial aparecerán una serie de constantes, por lo que para obtener la solución única es necesario definir esas constantes. Para ello habrá que fijar algunas condiciones adicionales, que son las *condiciones iniciales o de frontera.*

Como la ecuación del calor es de segundo orden en las coordenadas espaciales (contiene la segunda derivada de la temperatura) se necesitan dos condiciones de frontera para cada coordenada, pudiendo ser valores específicos de la temperatura o primeras derivadas en las fronteras del problema.

Así, consideremos el caso de una pared plana. Una forma de definir las condiciones de frontera es especificar las temperaturas en ambas superficies de la pared. Por otra parte, si se conociera el flujo de calor sobre una superficie se podría utilizar esa información, de manera que la condición de frontera resultaría de un balance de energía superficial.

Como por otro lado la ecuación de conducción es de primer orden en el tiempo, se necesita una condición inicial, es decir, una expresión matemática de la distribución inicial de temperaturas en el medio.

4.3. Conducción del calor en estado estacionario en paredes planas

En el apartado 3 ya habíamos obtenido una expresión para el cálculo del flujo de calor a través de una pared plana de una capa, suponiendo conocida la distribución de temperaturas en la pared. Ahora que ya disponemos de la ecuación del calor vamos a resolver el problema de forma general.

4.3.1. Pared de una capa

Consideremos nuevamente el caso de una pared plana de una sola capa de espesor *L* y conductividad *κ*, ver Figura 8 del apartado 3.1.3. Se trata de una situación estacionaria y establecemos dos condiciones de contorno, que son las temperaturas en las superficies de la pared, esto es:

$x=0 \qquad T=T_1$
$x=L \qquad T=T_2$

La solución general de la ecuación del calor es en este caso:

$$\frac{d^2 T}{d^2 x} = 0 \qquad\qquad T=A.x+B$$

donde *A* y *B* son dos constantes. Para determinarlas, utilizamos las dos condiciones de contorno, resultando finalmente:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L}.x$$

Por lo tanto el flujo de calor por unidad de superficie es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_2}{L/\ \kappa} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

siendo R la resistencia térmica a la conducción de la pared , esto es:

$$R = \frac{L}{\kappa}$$

4.3.2. Pared de varias capas

En la realidad los cerramientos de los edificios están normalmente constituidos por varias capas de materiales diferentes. Como consideramos situación estacionaria, el flujo de calor en una capa es el mismo que en las restantes.

Cada capa ofrece una resistencia térmica al flujo de calor que, como acabamos de ver, se calcula dividiendo el espesor de la capa por la conductividad térmica del material. Aparecen por tanto varias resistencias en serie, de manera que la resistencia total equivalente, utilizando la analogía eléctrica, es la suma de las resistencias

Consideremos el caso de una pared de tres capas, tal y como la que se muestra en la Figura 17. Sean T_1 y T_4 las temperaturas en las superficies de la pared.

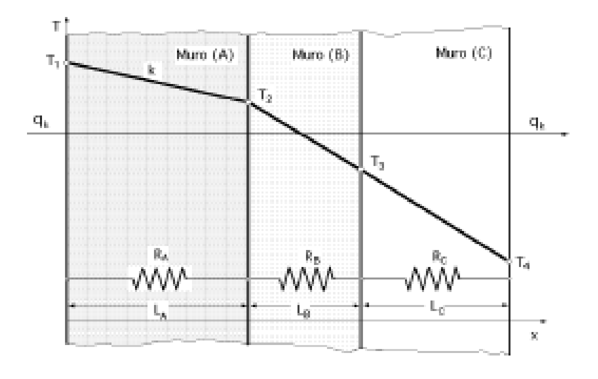


Fig.17. Pared de tres capas y sus resistencias térmicas.

La resistencia total de la pared es:

$$R_{pared} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{L_1}{\kappa_1} + \frac{L_2}{\kappa_2} + \frac{L_3}{\kappa_3}$$

siendo el calor flujo de calor:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_4}{R_{pared}}$$

Así pues, conocidas las temperaturas superficiales y el espesor y conductividad de cada capa se calcula el flujo de calor. Es claro que la caída de temperatura dividida por la resistencia térmica de cada capa es constante y por tanto, cuanto mayor es la resistencia térmica mayor es la caída de temperatura, es decir:

$$\Delta T = Q.A.R$$

Así pues, en un cerramiento cualquiera la mayor caída de temperatura corresponde a la capa de aislamiento, que es la que presenta la mayor resistencia térmica.

Conocido el flujo de calor se puede determinar la temperatura superficial en cualquier superficie o interfase. Así, por ejemplo, la temperatura T_2 se puede obtener a partir de la ecuación:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_2}{L_1/\ \kappa_1}$$

donde la única incógnita es T_2. Evidentemente también podría obtenerse a partir de:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_2 - T_4}{\frac{L_2}{\kappa_2} + \frac{L_3}{\kappa_3}}$$

4.3.3. Transmitancia térmica

El flujo de calor que se transmite por conducción a través de las diversas capas de la pared compuesta entra y sale a través de las superficies de la pared mediante los mecanismos de convección y radiación.

Recordando lo que veíamos en el apartado 3, vamos a llamar R_{se} y R_{si} a la resistencia térmica equivalente a la convección y radiación de las superficies exterior e interior de la pared respectivamente. Siendo T_e y T_i las temperaturas del aire exterior e interior, el flujo de calor es:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_4}{R_{pared}} = \frac{T_e - T_1}{R_{se}} = \frac{T_4 - T_i}{R_{si}}$$

Expresando el flujo de calor en función de las temperaturas del aire T_e y T_i resulta:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_e - T_i}{R_{pared} + R_{se} + R_{si}} = \frac{T_e - T_i}{R_{total}}$$

Todas las resistencias térmicas están en serie, de manera que la resistencia térmica equivalente es la suma de todas ellas. Para caracterizar el comportamiento térmico de un cerramiento es muy cómodo referirlo a las temperaturas del aire T_e y T_i y por tanto utilizar la R_{total}.

Sin embargo, ello tendría el inconveniente de que sería una propiedad que dependería no solamente de las propiedades del cerramiento, sino también de condiciones ajenas a él, como la velocidad del viento, radiación intercambiada con otras superficies, etc. Por esta razón los valores que se utilizan para R_{se} y R_{si} son unos valores normalizados, tal y como veíamos en el apartado anterior y aparecen en el CTE.

A veces resulta más cómodo utilizar una expresión similar a la de la ley de Newton. Se define entonces un coeficiente que se denomina la *transmitancia térmica* del cerramiento *U,* de forma que:

$$Q = U.A(T_e - T_i)$$

siendo evidentemente:

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$

Así pues, para calcular la transferencia de calor a través de un cerramiento no es necesario conocer las temperaturas superficiales de la pared. Basta con conocer su transmitancia térmica y las temperaturas del aire. A partir del flujo de calor se pueden obtener las temperaturas superficiales, ya que:

$$\frac{Q}{A} = \frac{T_e - T_1}{R_{se}} = \frac{T_4 - T_i}{R_s i}$$

4.3.4. Valores límite de la transmitancia térmica

El Código Técnico de la Edificación (CTE) en su Documento Básico HE, Ahorro de Energía, establece como objetivo el ahorro de energía, que consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable.

Para lograr ese objetivo una de las exigencias es la de limitar la demanda de energía de los edificios, en función del clima de la localidad en la que se ubican, de la zonificación climática y de la carga interna en sus espacios.

Para ello la demanda energética debe ser inferior a la de un edificio de referencia, en el que los parámetros característicos de los cerramientos y particiones interiores que componen su envolvente térmica tienen unos valores límite. Estos parámetros característicos son la transmitancia térmica de fachadas, cubiertas, suelos, etc.

Así, por ejemplo, para la zona climática A3 el valor límite de la transmitancia para muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno es U_{Mlim}=0,94 W/m^2.K, para suelos U_{Slim}=0,53 W/m^2.K, para cubiertas U_{Clim}=0,50 W/m^2.K, etc.

En el caso de huecos el valor límite de la transmitancia depende, además, de la orientación y del tanto por ciento de superficie de huecos. Así, para esa zona climática A3, si la superficie de huecos es < 10% y la orientación es Norte la U_{Hlim}=5,7 W/m^2.K, mientras que si el porcentaje de huecos es $30 \leq \% < 40$, entonces U_{Hlim}=3,8 W/m^2.K, etc.

4.4. Conducción del calor en cilindros

Debido a la presencia en un edifico de numerosas tuberías en las que tiene lugar transmisión de calor, vamos a hacer una breve introducción al cálculo del flujo de calor en tuberías para el caso estacionario.

La pared de la tubería separa dos fluidos a temperaturas diferentes, de manera que el gradiente de temperaturas en la dirección radial suele ser importante. Sin embargo, el flujo de calor a lo largo del eje, o para las diferentes direcciones se puede despreciar, de manera que se puede considerar un problema monodimensional y estacionario.

La ecuación del calor resulta entonces tener la forma siguiente:

$$\frac{d}{dr}\left(r.\frac{dT}{dr}\right) = 0$$

Si r_1 es el radio interior de la tubería, $T(r_1)$ la temperatura en esa superficie interior, r_2 el radio exterior y $T(r_2)$ la temperatura en la superficie exterior, integrando la ecuación anterior e imponiendo estas dos condiciones de contorno resulta:

$$T(r) = \frac{ln(r/r_1)}{ln(r_2/r_1)}(T_2 - T_1)$$

De acuerdo con la ley de Fourier el flujo de calor es:

$$\frac{Q}{A} = -\kappa\frac{dT}{dr}$$

Derivando la expresión de la temperatura y llevando a la ecuación anterior resulta:

$$Q = 2\pi\pi.\frac{T_1 - T_2}{ln(r_2/r_1)}$$

En una geometría plana está claro que cuanto mayor es el espesor de aislamiento menor es la transmisión de calor. Esto es evidente, ya que el área de la transferencia de calor *A* es constante, en tanto que la resistencia térmica aumenta con el espesor.

Sin embargo, esta situación no se presenta en el caso de la geometría cilíndrica, ya que al aumentar el espesor del aislamiento aumenta la resistencia térmica pero también aumenta la superficie de intercambio *A*, de manera que

pudiera ocurrir que al aumentar el espesor del aislamiento en una tubería aumentáramos la pérdida de calor.

Consideremos una tubería metálica de radio exterior r_1 y que se mantiene a temperatura constante T_1. La conductividad del metal es tan elevada y el espesor de la tubería lo suficientemente pequeño como para considerar que la resistencia térmica del tubo es nula. Recubrimos la tubería con una capa de aislamiento de conductividad κ y sea r_2 su radio exterior. Siendo h_e el coeficiente de convección de la tubería con el aire y T_a la temperatura de éste, el flujo de calor a través de la tubería resulta:

$$Q = \frac{T_1 - T_e}{\dfrac{ln(r_2/r_1)}{2\pi\pi.k.} + \dfrac{1}{2\pi.\, r_2 L.h_e}}$$

El valor de r_2 para el cual Q alcanza un valor máximo se obtiene a partir de la condición $dQ/dr_2=0$. De esta ecuación resulta que ese valor, al que se denomina *radio crítico* es:

$$r_{cr} = \frac{\kappa}{h}$$

Por tanto, al aislar una tubería podría aumentar la transferencia de calor en lugar de disminuir si $r_2 < r_{cr}$. Este radio crítico tendrá un valor máximo cuando *κ* sea grande y *h* pequeño. El valor más bajo de *h* está en la práctica en torno a 5 W/m^{2}ºC y un valor típico de la conductividad térmica de los materiales aislantes es de 0,05 W/mºC. Por tanto, el valor más grande del radio crítico es alrededor de 1cm. Esto significa que cualquier tubería de agua caliente o fría de un edificio se puede aislar, sin preocuparnos porque pudiera aumentar la transferencia de calor. Esta situación es muy diferente en el caso de los alambres eléctricos.

4.5. Puentes térmicos

En este apartado nos hemos referido al flujo de calor en el caso de geometría plana y hemos hecho unos comentarios sobre la cilíndrica, pero en todo caso flujo unidimensional. Sin embargo, en la envolvente de un edificio se presentan situaciones donde el modelo unidimensional es insuficiente y hay que resolver el problema bi o incluso tridimensional.

Es el caso de los puentes térmicos. Se consideran *puentes térmicos* las zonas de la envolvente del edificio en las que se evidencia una variación de la uniformidad en la construcción, ya sea por un cambio de espesor del cerramiento, cambio de los materiales empleados, por penetración de elementos constructivos de diferente conductividad, etc.

Ejemplos típicos de puentes térmicos son las penetraciones de forjados en las fachadas, la unión entre cerramientos verticales, las esquinas salientes o entrantes, etc. En la Figura 18 se muestra a modo de ejemplo un puente térmico formado por un frente de forjado.

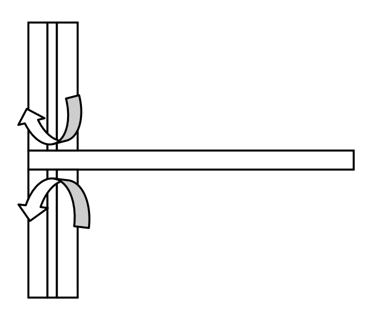


Fig. 18. Puente térmico formado por un frente de forjado.

En un edificio que tenga una estructura metálica o de hormigón, los pilares y vigas harán de puente térmico respecto a la fábrica de albañilería, que normalmente será de ladrillo o de bloques huecos de hormigón. En efecto, una fábrica de albañilería que sea interrumpida por un pilar o una viga experimentará un puente térmico en esa zona, pues el pilar o viga transmiten mejor el calor, provocando una pérdida de calor y apareciendo un "punto frío" que puede originar condensación.

Un modo usual de resolver este tipo de puente térmico es no situar los pilares o vigas enrasadas con la fachada por su parte externa, sino rehundidos unos centímetros respecto de la fábrica de albañilería, lo suficiente para cubrirlos con un aislante térmico exterior.

La presencia de puentes térmicos incrementa el flujo de calor provocando mayores pérdidas térmicas y disminución (o elevación) local de temperaturas superficiales, lo que provoca un riesgo de condensaciones superficiales.

Los puentes térmicos se suelen clasificar atendiendo a distintos puntos de vista. De acuerdo con la configuración espacial del flujo de calor se clasifican en *puentes térmicos lineales*, en los que el flujo es bi-dimensional, como el hueco de una ventana, un frente de forjado, etc. o *puentes térmicos puntuales* en los que el flujo es tri-dimensional, como puede ser una esquina.

Para corregir adecuadamente los puentes térmicos sirve un espesor relativamente pequeño de aislamiento, que restablece el flujo de calor unidimensional. Por otra parte, las pérdidas de calor a través de la discontinuidad del aislamiento son aproximadamente las mismas para un sistema de aislamiento por el exterior que para un sistema de aislamiento por el interior, o para uno intermedio con el aislamiento en cámara.

Sin embargo, en cuanto al riesgo de condensaciones el aspecto crucial es la posición del aislamiento. Si se coloca por el exterior, el cerramiento en su conjunto está caliente con lo que el efecto del puente térmico se diluye. Por el contrario, si se coloca por el interior, el cerramiento está frío en su conjunto y la discontinuidad del aislamiento tendrá efecto máximo sobre la temperatura de la superficie interior en la zona del puente térmico. Por tanto, bajo este punto de vista, cuanto más al exterior se coloque el aislamiento tanto mejor.

Un caso muy frecuente de puente térmico es el de las ventanas de doble vidrio con marco de aluminio. El doble cristal es un muy buen aislante, pero el aluminio es un buen conductor. Para evitar esa transmisión de calor se usa lo que se denomina la *rotura de puente térmico*, que en el caso de las ventanas de aluminio consiste en utilizar un perfil separador de plástico embutido en el propio perfil de aluminio.

La solución del problema de la transmisión de calor en puentes térmicos requiere resolver el problema en dos o tres dimensiones. Existen diferentes métodos propuestos, que se pueden consultar en la bibliografía [9].

4.6. Intercambios de calor por radiación en las superficies de los cerramientos

En el apartado 2 vimos los aspectos fundamentales de la radiación térmica y de las propiedades de las superficies relativas a la radiación. En este apartado presentamos los fundamentos de los intercambios de radiación entre superficies, en primer lugar en el caso ideal de superficies negras y después en el caso de superficies grises.

El intercambio de calor entre superficies depende de la orientación de unas respecto a las otras, de sus temperaturas y de sus propiedades respecto a la radiación. De forma general, dadas dos superficies a las temperaturas T_1 y T_2 el calor de radiación intercambiado entre ellas tiene la forma general siguiente:

$$\frac{Q}{A} = F_\varepsilon . F_G . \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

donde F_ε es un factor que está asociado a las propiedades de radiación de las superficies y F_G es el factor geométrico, que depende de las superficies y su orientación.

Al factor geométrico se le denomina *factor de forma* o *factor de visión* y representa la fracción de la radiación que sale de una de las superficies y llega directamente a la otra. Suponiendo que las superficies son emisoras y reflectoras difusas, el factor de visión se calcula según la expresión:

$$F_{12} = \frac{1}{A_1} \iint_{A2A1} cos\varphi_1 . cos\varphi_2 \frac{dA_1 . dA_2}{\pi r^2}$$

donde r es la distancia entre las superficies, y φ_1 y φ_2 son los ángulos que se forman entre la normal a cada superficie y la distancia entre ellas.

Los factores de forma presentan una serie de propiedades. Así, se cumple la relación de reciprocidad, de manera que para dos superficies cualesquiera se tiene:

$$A_1 . F_{12} = A_2 . F_{21}$$

Existen otra serie de relaciones, como la de la suma, la de superposición, etc. Se han calculado los factores de visión para miles de configuraciones geométricas de interés en ingeniería. Los resultados se presentan en las publicaciones en forma gráfica, tabular o analítica, existiendo software disponible para calcular en cualquier configuración.

4.6.1. Intercambios de calor entre superficies negras

Dadas dos superficies negras de temperaturas T_1 y T_2, el calor intercambiado entre ambas superficies será:

$$Q_{12} = \begin{pmatrix} \text{Radiación que sale} \\ \text{de la superficie1} \\ \text{y choca contra la 2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Radiación que sale} \\ \text{de la superficie 2} \\ \text{y choca contra la 1} \end{pmatrix}$$

es decir:

$$Q_{12} = A_1 . E_{b1} . F_{12} - A_2 . E_{b2} . F_{21}$$

Aplicando la relación de reciprocidad se tiene:

$$Q_{12} = A_1 . F_{12} . \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

En el caso de una cavidad constituida por N superficies negras el calor intercambiado por una superficie i cualquiera es la suma de los calores intercambiados con el resto de superficies, es decir:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N} Q_{ij} = \sum_{j=1}^{N} A_i . F_{ij} . \sigma(T_i^4 - T_j^4)$$

4.6.2. Intercambios de calor entre superficies grises

Si bien los intercambios de radiación entre superficies negras son fáciles de calcular, las superficies de los cerramientos de un edificio se pueden considerar como grises, por lo que la radiación experimenta múltiples reflexiones. Por tanto, la radiación que sale de una superficie gris consta de una parte emitida y otra reflejada.

Se llama *radiosidad* J a la energía total de radiación que sale de una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área. Así pues, para una superficie gris de emisividad ε la radiosidad es:

$$J = \varepsilon . E_b + \rho . G = \varepsilon . E_b + (1 - \varepsilon) G$$

donde G es la irradiación, es decir, la energía que incide a la superficie por unidad de área y de tiempo. Por tanto, el calor de radiación intercambiado por una superficie gris es:

$$\frac{Q}{A} = J - G = \varepsilon . E_b + (1 - \varepsilon) G - G$$

y en definitiva:

$$Q = \frac{E_b - J}{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} A}$$

En el caso general de N superficies grises, el calor intercambiado por radiación por una superficie cualquiera i es:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{N} Q_{ij} = \sum_{j=1}^{N} A_i.F_{ij}(J_i - J_j)$$

Combinando esta ecuación con la anterior se tiene:

$$\frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} A_i} = \sum_{j=1}^{N} A_i.F_{ij}\left(J_i - J_j\right) \qquad \{i=1, N\}$$

Para resolver el problema de radiación es necesario conocer las temperaturas de cada una de las superficies (o el calor neto intercambiado) con el fin de obtener una solución única para los flujos de calor intercambiados (o las temperaturas) desconocidos. Suponiendo que las temperaturas son conocidas, resulta:

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^{N} F_{ij}(J_i - J_j) \qquad \{i=1, N\}$$

Se tiene así un sistema de N ecuaciones que nos permite determinar las N radiosidades J_i de cada una de las superficies. Este sistema de ecuaciones puede resolverse con el software hoy disponible como EES, Matlab o Mathcad. Una vez conocidas las radiosidades, se calculan de forma inmediata los flujos de calor intercambiados.

4.6.3. Efecto de los films reflexivos

La transmisión de calor por radiación entre dos superficies se puede reducir en gran medida insertando una lámina de alta reflectividad entre ellas.

En efecto, consideremos dos superficies planas y paralelas a temperaturas T_1 y T_2 y de emisividades ε_1 y ε_2 respectivamente. Aplicando el método anteriormente descrito es muy fácil deducir que el calor intercambiado entre ambas superficies es:

$$Q_{12} = \frac{A\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \varepsilon_{ef}.A.\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Utilizando unos valores para la emisividad de 0,9, que son típicos para materiales de construcción resulta una emisividad efectiva de ε_{ef} = o,82. Colocamos ahora un film reflexivo, por ejemplo una lámina de aluminio entre ambas superficies. Se entiende por *film reflexivo* un conjunto de materiales semirrígidos que están formados por diversas capas, envueltos externamente por una capa de aluminio pulido y que se comercializan generalmente en rollos.

En la Figura 19 se ha colocado el film reflexivo entre una capa de cartón yeso y un muro de ladrillo.

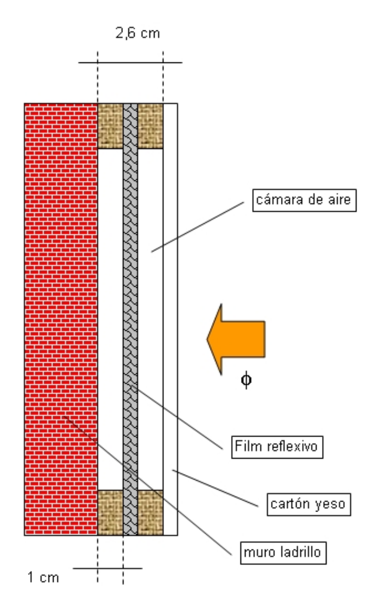


Fig. 19. Film reflexivo colocado en una cámara de aire.

Llamando ε_3 a la emisividad del film reflexivo resulta que el intercambio de radiación entre las dos superficies de yeso y el muro de ladrillo resulta ser:

$$Q_{12} = \frac{A.\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1\right)}$$

Utilizando los valores típicos para la emisividad del aluminio resulta que la emisividad efectiva es ahora ε_{ef} = 0,024. Por tanto, el calor intercambiado por radiación entre ambas superficies se ha reducido a un 3% del valor primitivo. Así pues, la colocación de un film reflexivo en una cámara de aire prácticamente elimina el mecanismo de transmisión de calor por radiación. Esto explica el interés de la utilización de este tipo de films en la construcción [10].

Las prestaciones de los films reflexivos no son comparables a las de los aislamientos habituales que se emplean en la construcción formando parte de los cerramientos.

4.7. Transmisión de calor en ventanas

Las ventanas hacen posible la entrada de la luz del día y del calor solar en el interior del edificio, permiten a las personas ver el exterior sin salir del edificio y además desempeñan un papel arquitectónico importante, ya que

permiten mejorar la apariencia del edificio. Así mismo, una parte importante de la pérdida de calor en invierno tiene lugar por conducción a través de las ventanas y porque contribuyen de forma importante a las infiltraciones.

En este apartado, tras analizar los mecanismos de intercambio de calor en un vidrio, obtendremos la expresión de la transmitancia térmica del vidrio y definiremos lo que se entiende por factor solar. A partir de aquí nos referiremos a la ventana en su conjunto y veremos la forma de calcular la transmitancia térmica de una ventana y el factor solar de la ventana, a partir de las expresiones que aparecen en el CTE:

4.7.1. Mecanismos de transmisión de calor en los vidrios

De la radiación solar incidente sobre la superficie de un vidrio, parte se refleja al exterior (alrededor de un 10% para un vidrio sin recubrimiento), parte es absorbida dentro del vidrio (puede variar entre un 5 a un 50 % dependiendo de la composición y del grosor del vidrio) y el resto se transmite hacia el interior.

La radiación que se transmite al interior es en parte absorbida y el resto reflejada, cuando incide con las superficies de las paredes interiores, muebles, personas, etc. de forma que finalmente representa una ganancia de calor.

La radiación solar absorbida por el vidrio se transmite por conducción a través de él. Finalmente sale por la superficie interior y exterior por convección y radiación de onda larga. Además, debido a la diferencia de temperaturas entre el aire interior y el exterior hay un intercambio de calor por convección entre el aire y el vidrio.

En definitiva, en un vidrio tenemos los siguientes mecanismos de intercambio de calor:

• Reflexión, absorción y transmisión de radiación solar directa y difusa (onda corta).

• Conducción, convección y radiación de onda larga de la radiación solar absorbida.

• Intercambios de radiación de onda larga con otras superficies internas del local y con el entorno.

• Conducción y convección debido a la diferencia de temperaturas entre el aire interior y exterior.

En la Figura 20 se presenta esquemáticamente los diferentes mecanismos de transmisión de calor que intervienen en el vidrio de una ventana.

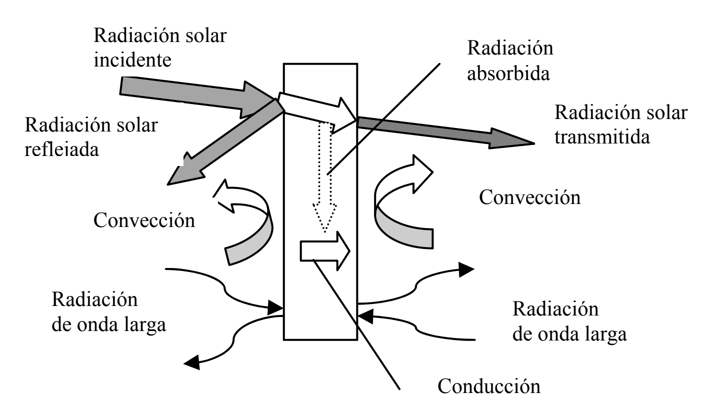


Fig. 20. Mecanismos de intercambio de calor en un vidrio.

4.7.2. Calor intercambiado por la superficie interior de un vidrio. Factor solar.

Consideremos un vidrio de una sola hoja. La red de resistencias térmicas consiste en una resistencia térmica superficial sobre la superficie exterior, otra sobre la superficie interior y la resistencia a la conducción del vidrio.

Utilizando los valores típicos de las resistencias superficiales, por ejemplo los del CTE, y comparando con la resistencia del vidrio se comprueba que ésta no es mayor del 2% de la resistencia total. Por tanto, podemos considerar que la temperatura del vidrio es uniforme, es decir, que las superficies interior y exterior del vidrio están a la misma temperatura [11].

Siendo G la irradiación total (directa y difusa), α la absortividad del vidrio, h_e y h_i los coeficientes superficiales interior y exterior (suma de la convección y radiación de onda larga) y T_v la temperatura del vidrio, del balance de energía en el vidrio se tiene:

$$G.\alpha = h_i(T_v - T_i) + h_e(T_v - T_e)$$

Por lo tanto la temperatura del vidrio es:

$$T_v = \frac{G.\alpha + h_e.T_e + h_i.T_i}{h_e + h_i}$$

El flujo de calor de la superficie del vidrio hacia el interior será la suma de la radiación solar transmitida y del calor intercambiado por convección y radiación de onda larga, es decir:

$$q_i = G.\tau + h_i(T_v - T_i)$$

donde se ha considerado una transmisividad única, igual para la radiación directa que la difusa. Sustituyendo en esta expresión el valor anteriormente obtenido para T_v resulta:

$$q_i = G.\tau + \frac{h_i}{h_i + h_e}\left(G.\alpha + h_e(T_e - T_i)\right)$$

Teniendo en cuenta que la resistencia térmica del vidrio es prácticamente despreciable y que por tanto:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$$

podemos escribir:

$$q_i = \left(\tau + \frac{U.\alpha}{he}\right)G + U(T_e - T_i)$$

El primer sumando representa la radiación solar que penetra al interior, una parte de forma directa y la otra después de haber sido absorbida en el vidrio. Pues bien, a este término se le llama *factor solar* o *ganancia de calor solar* y se representa por el símbolo *F,* de modo que:

$$F = \tau + \frac{U.\alpha}{he}$$

Por lo tanto, el factor solar (adimensional) es la suma de la fracción transmitida directamente y de la absorbida y vuelta a emitir de la radiación solar que incide sobre el vidrio. Su valor va desde 0 (opaco) a 1 (hueco sin acristalamiento).

4.7.3. Transmitancia térmica de una ventana

En una ventana, además del vidrio hay que tener en cuenta el marco, con una estructura y propiedades muy diferentes. Además, hay una zona del borde del vidrio en la que la transmisión de calor es bidimensional. Esta zona es una banda de unos 6-7 cm de ancho alrededor del perímetro del vidrio.

Por ello al analizar la transmisión de calor en las ventanas es muy frecuente considerar tres zonas: el centro del vidrio, el borde del vidrio y el marco, cada una con su correspondiente superficie y su transmitancia térmica.

El CTE, que es la Normativa vigente, distingue entre el vidrio y el marco, de manera que la expresión que propone para la transmitancia térmica de la ventana es:

$$U_H = (1 - FM)U_{HV} + FM.U_{Hm}$$

donde *FM* es la fracción de hueco ocupado por el marco, U_{HV} es la transmitancia térmica del vidrio y U_{Hm} es la transmitancia térmica del marco.

4.7.4. Factor solar de una ventana

No toda la radiación que podría incidir en una ventana llega a ella realmente, ya que podemos contar con dispositivos de sombra. Dependiendo de si el elemento de sombra se coloca al interior o al exterior tenemos dispositivos de sombreado interno y externo

Entre los externos son muy comunes los voladizos del techo, que bloquean los rayos solares en verano, cuando el sol está alto y dejan pasar la mayor parte de ellos en invierno. Hay también otros elementos exteriores, como pantallas, mallas contra insectos, etc.

Los dispositivos internos reducen la ganancia solar mediante la reflexión de la radiación solar transmitida a través del cristal, antes de que sea absorbida y convertida en calor en el edificio. Así los cortinas, sobre todo las de color claro, reflejan la radiación solar y además el espacio semicerrado de aire que forman es una barrera a la transmisión de calor, reduciendo la transmitancia térmica de la ventana.

De acuerdo con el CTE, el factor solar de los huecos se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_H = \delta[(1 - FM)F_{HV} + FM.0{,}04.U_{Hm}.\alpha]$$

donde δ es el factor de sombra, que depende del dispositivo de sombra del hueco, F_{HV} es el factor solar del vidrio y α es la absortividad del marco. En el mismo CTE se presentan una serie de tablas para determinar el factor de sombra, así como la absortividad del marco.

4.7.5. Mejoras del comportamiento energético de una ventana

Ya hemos visto anteriormente que la resistencia térmica del vidrio es prácticamente despreciable frente a las resistencias superficiales exterior e interior. Por lo tanto, no tendría sentido tratar de reducir la transmisión de calor a través del vidrio aumentando su espesor.

• Doble hoja o triple hoja

Pero sí se puede aumentar la resistencia térmica atrapando aire entre dos o más capas de vidrio. Así resulta la ventana de doble hoja o triple hoja, que es la norma actual en la construcción de ventanas. Como la conductividad del aire es κ_{aire}=0,025W/mºC y la del vidrio ordinario κ_v= 0.75W/mºC, resulta que la resistencia térmica de una capa de aire de 1 cm de espesor es equivalente a un vidrio de 30 cm de espesor.

Aproximadamente la mitad de la transferencia de calor que se produce en la cámara de aire tiene lugar por conducción y la otra mitad por radiación, entre la superficie exterior del vidrio interior y la superficie interior del vidrio exterior. Vamos a ver la manera de reducir la velocidad de transmisión del calor por cada uno de estos mecanismos.

• Minimizar la conducción a través del espacio de aire

Para ello se puede aumentar el espesor de la cámara de aire. Pero esto no se puede realizar indefinidamente, ya que a partir de una cierta separación se generan corrientes de convección y por tanto se acelera la transmisión de calor [12].

Otra manera de reducir la conducción es sustituyendo el aire por un gas menos conductor, como puede ser el argón. Ello requiere un buen sellado para que el gas no fugue al exterior. Así mismo, otra posibilidad es hacer el vacío, lo que eliminaría el mecanismo de conducción.

• Vidrios bajo emisivos

Para reducir la transmisión de calor por radiación se puede reducir la emisividad de las superficies del vidrio, recubriéndolas con un material de baja emisividad. Hemos

visto que la emisividad efectiva entre dos superficies plano-paralelas es:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Como la emisividad del vidrio común es de 0,84, la emisividad efectiva será de 0,72. Si recubrimos ambos vidrios con una capa de emisividad 0,1, la emisividad efectiva es de 0,05 y por lo tanto, la transmisión de calor por radiación se hace 14 veces menor. Lo habitual suele ser recubrir sólo una de las superficies, ya que con una sola capa de emisividad 0,1, la velocidad de transmisión de calor por radiación se hace 10 veces menor.

• *Tipos de vidrios según el clima*

En climas fríos interesa que los vidrios tengan una alta transmisividad para todo el espectro solar (que dejen pasar la radiación solar) y una baja emisividad (alta reflectividad) para la radiación infrarroja emitida por paredes y muebles (que no deje pasar la radiación del interior al exterior) [13].

Por el contrario, en los climas cálidos los vidrios deben permitir el paso de la radiación visible, pero no el de la radiación solar infrarroja (ya que será carga de refrigeración). Para ello se debe colocar sobre la superficie exterior del vidrio una capa reflectora de la radiación infrarroja. Además, interesará igualmente recubrir la superficie interior del vidrio de una capa bajo emisiva, ya que de esta manera, al estar el vidrio más caliente que el interior se reduce la ganancia de calor.

4.8. Conclusiones

Este apartado trata de aplicar los conceptos ya introducidos en apartados anteriores sobre transmisión de calor en el caso de los edificios. Para resolver los problemas de conducción nos faltaba poder determinar el campo de temperaturas. Para ello se dispone de una ecuación diferencial, llamada ecuación del calor, que resulta de aplicar el principio de conservación de la energía en un volumen elemental.

Se han considerado separadamente los cerramientos opacos de los semitransparentes. En el caso de los cerramientos opacos se ha analizado la transmisión de calor unidimensional y estacionaria, introduciendo el concepto de transmitancia térmica. Se hace una breve introducción a la transmisión de calor en coordenadas cilíndricas, por ser de aplicación en la transmisión de calor en tuberías.

Se estudia después la transmisión de calor en vidrios, apareciendo un concepto nuevo como es el de factor solar. Tras estudiar los vidrios se llega a las ventanas y se presentan las expresiones del CTE para el cálculo de la transmitancia térmica y el factor solar. Por último, se hacen una serie de consideraciones para valorar los posibles caminos a seguir con el fin de mejorar el comportamiento térmico de las ventanas.

5. Casos prácticos de transmisión de calor y humedad en edificios

5.1. Transmisión de calor en un muro Trombe

El muro Trombe es un sistema de aprovechamiento de la radiación solar integrado en la fachada de los edificios, que fue propuesto en la década de los 60 por los franceses F. Trombe y J. Michel.

Un muro Trombe es un elemento compuesto por una hoja exterior transparente, una cámara con circulación de aire cuyas tomas y descargas comunican con el espacio interior del edificio y un elemento masivo (muro) que limita con el interior y con la cámara de aire, ver Figura 21.

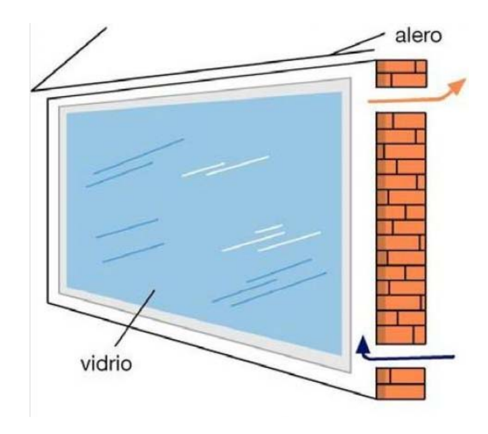


Fig. 21. Muro Trombe.

El funcionamiento del muro se basa en algo tan simple, como es la diferencia de densidad entre el aire frío y el caliente, que provoca unas corrientes en uno u otro sentido dependiendo de la disposición de las trampillas y en lo que se denomina el efecto invernadero.

En efecto, tal como hemos descrito en el apartado 3, el vidrio ordinario es prácticamente transparente al espectro visible pero es opaco (su transmisividad es prácticamente nula) para las radiaciones de onda larga. De esta manera la radiación solar atraviesa el vidrio y se absorbe en la superficie del muro. Tanto el muro como la cámara de aire pueden alcanzar temperaturas mucho más elevadas con el cristal que sin él, debido a ese efecto invernadero.

El muro debe ser capaz de absorber esa energía de radiación y ello dependerá de su difusividad y de la masa. Interesa un muro con una baja difusividad, por tanto con una densidad ρ y calor específico c elevados y una baja conductividad térmica κ. Además, el muro debe tener una cierta masa, por lo tanto para una densidad y área determinadas, la masa dependerá del espesor, de manera que para cada material habrá un espesor óptimo en cada aplicación.

El espesor óptimo del muro aumenta con la conductividad. Un muro con una κ elevada transfiere rápidamente el calor de la superficie exterior al interior y por ello se debe sobredimensionar, para que el calor transportado sea utilizado en el momento requerido (la noche), es decir, hay que identificar el punto en el que el muro entra en operación. Por el contrario si la κ del muro fuera baja entonces su espesor necesario será menor.

Interesa que la superficie del muro tenga una alta absortividad a la radiación solar (de onda corta). Por ello es importante escoger un color adecuado, como puede ser el negro ($\alpha = 0.95$) o un azul oscuro ($\alpha = 0.85$).

El aire en el interior de la cámara es impulsado por fuerzas de elevación, debidas a la diferencia de densidades entre el aire del exterior de la cámara y en el interior de ésta, provocada por la diferencia de temperaturas. En la Figura 21 se observa la situación de los dos huecos del muro Trombe y la circulación convectiva que se establece debida al calentamiento del aire. El aire frío se extrae por depresión del interior del edifico, se calienta a lo largo de la cámara y vuelve a entrar en el edificio.

Cuando la radiación solar deja de influir en este flujo, el interior recibe el calor a través de la inercia térmica del muro, que fue acumulando energía y con el paso del tiempo la onda de calor fue atravesando el muro hasta calentarlo por el lado interno.

Las aperturas pueden disponerse de manera que se aprovecha la energía solar para el precalentamiento del aire de ventilación. La circulación del aire es entonces del exterior al interior. En la bibliografía, a este tipo de elementos se les denomina también muros parietodinámicos [14].

Hemos descrito el funcionamiento del muro Trombe en condiciones de invierno. Pero actuando sobre las aberturas también se puede utilizar para lograr un efecto refrigerante. Con el fin de que entre menos radiación solar se colocará sobre el muro un alero. Se abren las compuertas de la parte superior del vidrio y el conducto de la parte inferior del muro, mientras que se cierra el conducto de la parte superior del mismo, ver Figura 22.

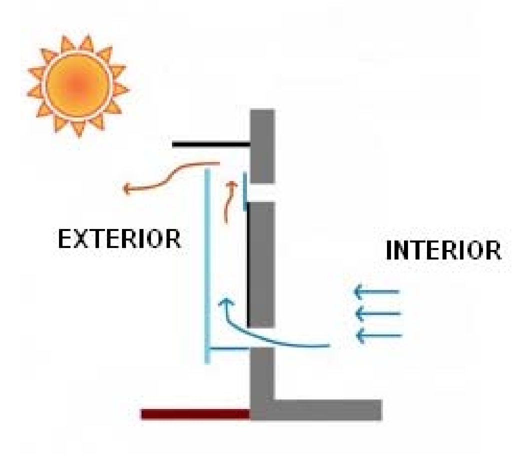


Fig. 22. Muro Trombe en verano.

La radiación que incide sobre el muro Trombe calienta el aire de la cámara, que por convección asciende y sale al exterior. El vacío dejado es ocupado por el aire del interior que entra por el conducto de la parte inferior del muro, provocando así el efecto refrigerante.

5.2. Transmisión de calor en una fachada ventilada acristalada

Este tipo de elemento constructivo pertenece al mismo tipo que el muro Trombe, ya que se trata de un elemento de doble envolvente, compuesto por dos hojas o pieles separadas por un espacio intermedio que normalmente se encuentra ventilado.

Un tipo de fachadas ventiladas son de hoja exterior opaca y hoja interior opaca. Se realizan con un revestimiento sujeto a una perfilería metálica, que a su vez se ancla al cerramiento interior. Entre ambas se encuentra la cámara de aire, provocándose la ventilación mediante aperturas superiores e inferiores. Dentro de este grupo hay muchas variantes de operación y numerosas alternativas de construcción.

Las fachadas ventiladas de hoja exterior semitransparente y hoja interior semitransparentes se utilizan cuando se quiere que la fachada tenga un aspecto acristalado. La hoja exterior es normalmente de un vidrio claro, mientras que la hoja interior es un vidrio doble o absorbente. En la cámara de aire se suele incorporar un elemento de control solar (generalmente un dispositivo de lamas) de geometría variable.

Este tipo de fachadas tiene dos regímenes de funcionamiento. Durante el invierno funcionan como un muro parietodinámico, es decir, con una circulación de aire exterior a interior. Durante el verano la circulación del aire es exterior/exterior, para lograr así el efecto refrigerante.

Vamos a describir los mecanismos de transmisión de calor que tiene lugar en una fachada ventilada vidriada con una hoja que es un vidrio simple, una cámara de aire dentro de la cual hay un elemento de sombra, por ejemplo, una persiana veneciana y otra hoja consistente en un vidrio doble, ver Figura 23 [15].

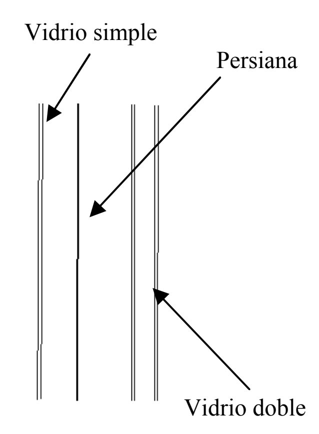


Fig. 23. Fachada ventilada vidriada.

• *Calor intercambiado con el exterior*

La superficie exterior del vidrio intercambia calor por radiación de onda larga con los alrededores y convección con el aire. El coeficiente de convección va a depender fundamentalmente de la velocidad del viento.

• *Calor transmitido por conducción en el vidrio*

Debido al gradiente de temperaturas entre la parte superior y la inferior de la fachada a lo largo de cada capa de vidrio habrá un calor transmitido por conducción. Este calor depende de la conductividad del vidrio y del gradiente de temperaturas existente.

• *Calor transmitido en el vidrio doble*

Entre las dos láminas del vidrio doble hay un intercambio de calor por convección y por radiación de onda larga. Será proporcional a la diferencia de temperatura de las láminas de vidrio y dependerá del coeficiente de convección-radiación de cada lámina.

• *Radiación solar absorbida en cada hoja*

La radiación solar absorbida depende de la irradiación (directa, difusa y reflejada) en cada lámina de vidrio, así como de la correspondiente absortividad del vidrio.

• *Calor intercambiado por convección*

En el interior de la fachada, cuando la persiana está extendida se forman dos cámaras de aire: una entre la hoja exterior y la persiana y la otra entre la persiana y la hoja interior. Este calor será el producto del coeficiente de convección por la diferencia de temperatura entre el aire y cada superficie.

• *Radiación de onda larga*

Entre las superficies vidriadas existe un intercambio de radiación de onda larga. Este calor se calcula a partir de las radiosidades, utilizando el método que se expuso en el apartado 4. No obstante, como para calcular las radiosidades se necesita conocer las temperaturas de las superficies, este calor se tiene que calcular de forma iterativa.

• *Calor intercambiado con el interior*

Lo mismo que para la superficie exterior, la superficie interior de la fachada intercambia calor con el aire interior por convección y por radiación con el resto de las superficies interiores del edificio y con los objetos presentes.

• *Flujo de entalpía del aire*

Además de estos calores intercambiados, en la cámara hay un caudal de aire y asociado a él un flujo de entalpía, que se obtendrá a partir de la densidad, la velocidad, el calor específico del aire y su temperatura.

Los modelos que traten de reproducir el comportamiento de la fachada ventilada deberán tener en cuenta estos diferentes mecanismos de transmisión de calor. Obteniendo las expresiones correspondientes para los mismos y mediante los balances de energía se construyen los modelos. Los hay de muy diferentes tipos, desde los más sencillos hasta modelos numéricos muy complejos.

Las fachadas ventiladas han supuesto un gran avance en el sector de la construcción, pues contribuyen a ahorrar energía en el interior del edificio y favorecen la disminución del tiempo de ejecución en obra, así como la reducción de costes.

Este sistema entra de lleno en la edificación sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Sus principales ventajas, un ahorro energético considerable, una reducción de costes y una disminución del tiempo de ejecución en obra, son premisas claramente ecológicas.

5.3. Transmisión de calor en una cubierta ajardinada

La cubierta es la parte del edificio que está sujeta a las mayores fluctuaciones térmicas, ya que durante el día alcanza elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación del sol, y durante la noche es la parte de la construcción que más calor pierde, por radiación hacia el espacio. Es necesario por tanto colocar aislamiento, pero por otra parte, la absorción de la radiación solar, con su consecuente transferencia de calor a sus elementos constituyentes, puede originar temperaturas excesivas.

Una posible solución a este problema son las cubiertas ajardinadas. La cubierta ajardinada es un tipo de cubierta invertida con la adición de un substrato orgánico y plantas por la capa superior.

Pueden ser extensivas o intensivas. La cubierta *ecológica o extensiva* tiene una capa vegetal de pocos centímetros de espesor (normalmente menor que 10 cm), con plantas de bajo porte (generalmente autóctonas), con abastecimiento de agua y sustancias nutritivas por procesos naturales. La cubierta ajardinada *intensiva o cubierta jardín* tiene un substrato de mayor espesor (mayor que 20 cm), plantas, árboles y arbustos de mayor altura y mantenimiento típico de cualquier jardín.

La cubierta vegetal tiene como característica principal el contar con un material termoactivo respecto a las condiciones climáticas del sitio donde se instala. En efecto, el comportamiento térmico de la cubierta ajardinada depende de la lluvia caída y en menor medida, de la humedad del aire atmosférico. Esta particular característica la diferencia frente a los otros materiales de construcción, ya que éstos no interactúan con el medio.

Vamos a considerar una cubierta ajardinada como la que se muestra en la Figura 24.



Fig. 24. Esquema de cubierta ajardinada.

Se trata de una cubierta constituida por las capas siguientes: la capa 1 es hormigón de 8,5 cm de espesor, la capa 2 son 8 cm de lana de roca, la capa 3 son 15,5 cm de hormigón, la capa 4 es hasta el impermeabilizante, la capa 5 está sobre el impermeabilizante y la capa 6, que es la superficie de la tierra que soporta la vegetación, son macetas tipo sedum.

Para el análisis de los mecanismos de transmisión de calor vamos a considerar tres zonas. La zona 1 va desde el aire interior hasta la capa 4. Esta parte de la cubierta está compuesta por dos capas de hormigón y la capa de aislante.

Esta primera zona es exactamente igual a una convencional, por ejemplo, que utiliza grava para recubrir la cubierta en lugar del ajardinamiento. Por tanto, su comportamiento térmico se caracterizará a través de su correspondiente resistencia térmica.

La zona 2 va desde la capa 4 (bajo el impermeabilizante) hasta la capa 6 (superficie de la tierra que soporta la vegetación). El comportamiento térmico de esta capa es variable según la carga de humedad que tenga. Cuando la tierra está húmeda la resistencia térmica de esta capa disminuye y cuando está seca aumentará. Por tanto, hay que buscar los límites de resistencia de esta capa para los dos casos, según esté húmeda o seca.

Por último, hay una zona 3 que va desde la superficie de la tierra que soporta la vegetación hasta el aire exterior. En esta zona se da el efecto de evapotranspiración que realizan las plantas. Este efecto depende de la cantidad de agua que disponen las plantas para realizar este proceso. En ausencia de agua el efecto se minimiza y cuando la vegetación dispone de agua en abundancia el fenómeno se maximiza.

Simplificando, la evapotranspiración se puede considerar que es un fenómeno que evapora agua al ambiente exterior de manera controlada por las plantas. La energía necesaria para realizar esta evaporación del agua proviene principalmente de la radiación solar incidente [16].

La energía solar incidente en la superficie exterior de la cubierta hace aumentar la temperatura de ésta, hasta llegar a un cierto valor para el que las ganancias solares se compensan con las pérdidas por convección y radiación intercambiadas por esa superficie. Para la realización de los cálculos, las pérdidas conjuntas debidas a la radiación y la convección se combinan en un único coeficiente h_{cr} y se utiliza la temperatura sol-aire, como vimos en el apartado 4.

En una cubierta sin ajardinamiento h_{cr} suele ser inferior a 25 W/m^{2}ºC, que es el valor establecido en el CTE y que lo considera constante para todo el año. Realmente para llegar a ese valor es necesario que haya unas velocidades de viento elevadas. En realidad este coeficiente es variable a lo largo del año y la norma aplica para todo el año el más desfavorable, calculado para las condiciones de invierno.

El h_{cr} evalúa la velocidad a la que la superficie exterior en estudio es capaz de evacuar calor al aire exterior. Cuanto menor sea el valor de h_{cr} significa que la temperatura a la que llegará la superficie de la cubierta será mayor, debido a que no es capaz de evacuar el calor que está llegando procedente de la radiación solar. Esto provocará que la superficie exterior de la cubierta aumente hasta valores que pueden superar los 60ºC en verano y parte de este calor acabará entrando en la vivienda.

El efecto de la evapotranspiración afecta de forma importante al valor de h_{cr} ya que su efecto es el de evacuar parte de la energía incidente, mediante la evaporación del agua que tiene al alcance la vegetación. Esto hará que h_{cr} aumente mucho, ya que al evaporar agua se pone en juego la energía asociada a la evaporación del agua líquida, que es muy elevada.

Este aumento de h_{cr} variará dependiendo de la cantidad de agua de la que dispone la vegetación. Por otro lado, en caso de no haber radiación solar, el efecto de evapotranspiración apenas va a afectar al comportamiento térmico de la cubierta.

Por ello es importante conocer cual es el valor máximo de h_{cr} que se puede alcanzar cuando la vegetación dispone de agua en abundancia y también, cual es su valor cuando la vegetación no ha tenido a su disposición agua durante un largo periodo de tiempo y el efecto de la evapotranspiración se minimiza.

Una vez se han obtenido los valores límites de la resistencia térmica de esta zona, a partir de los límites de h_{cr}, se puede evaluar el comportamiento de la cubierta en los casos extremos y se puede hacer una propuesta para la utilización óptima del ajardinamiento.

5.4. Balances de energía en un edificio

En el apartado 2 veíamos el concepto de ganancia térmica y carga térmica y cómo la demanda energética es la integral de las cargas en un periodo determinado. En este apartado vamos a presentar unas ideas básicas sobre la forma de calcular esa demanda de energía en un edificio cualquiera.

El cálculo de la demanda de energía se basa en la resolución de un sistema de ecuaciones que resulta de aplicar los balances de energía en las superficies exteriores del edifico, en las superficies interiores y en el aire de cada zona.

Las incógnitas son las temperaturas, que no hay que olvidar van a ser variables en el tiempo, de forma que una vez se calculan éstas, se obtienen los flujos de calor instantáneos, o cualquier integración temporal de los mismos. Como las solicitaciones tienen valores discretos, es decir, no están expresadas mediante ecuaciones dependientes del tiempo, el problema planteado no tiene

solución analítica.

Los métodos de resolución se clasifican básicamente en dos grupos: métodos directos e indirectos. Los *métodos directos* plantean y resuelven las ecuaciones de una sola vez, de forma que en principio el sistema de ecuaciones no tiene ninguna restricción en cuanto a su carácter y todas las solicitaciones se aplican simultáneamente. Es el más detallado.

Los *métodos indirectos* se basan en el principio de superposición de las solicitaciones y en la aplicación de leyes de convolución. En análisis funcional una convolución es un operador matemático que transforma dos funciones de una misma variable (en nuestro caso el tiempo) en una tercera, que representa la integral del producto de ambas, habiéndose desplazado una de ellas.

Ello requiere que las ecuaciones sean lineales y los coeficientes que aparecen en ellas deben ser constantes. Son métodos más rápidos de cálculo y proporcionan resultados desglosados por componentes [17].

Vamos a referirnos a las ecuaciones del balance de energía en cada superficie. Consideramos en primer lugar las superficies exteriores del edificio, que están en contacto con el aire exterior. En el apartado 2 veíamos los mecanismos de intercambio de calor que se presentan, de forma que la ecuación del balance de energía en un instante dado será:

$$q_{cd,e}(t) = q_c + q_{rl}^{at} + q_{rl}^{al} + q_{rc}$$

donde $q_{cd}(t)$ es el calor transmitido por conducción a través del cerramiento en el instante considerado, q_c es el calor intercambiado por conducción, q_{rl}^{at} y q_{rl}^{al} es el calor intercambiado por radiación de onda larga con la bóveda celeste y con los alrededores y q_{rc} es la radiación solar absorbida en la superficie.

Utilizando el concepto de temperatura sol-aire y el coeficiente global de convección-radiación todos los calores los podemos expresar de acuerdo a la igualdad siguiente:

$$q_{cd,e}(t) = h_{cr}(T_{sa} - T_s)$$

En el caso de una superficie interior *i,* en contacto con el aire interior del edificio, el balance de energía se escribe:

$$q_{cdi} = q_{ci} + q_{ri}^{c} + q_{ri}^{l}$$

donde q_{cdi} es el calor transmitido por conducción, q_{ci} es el calor intercambiado por convección con el aire interior, q_{ri}^{c} es la radiación de onda corta intercambiada, que engloba a la radiación solar que atraviesa los vidrios y a la parte onda de corta procedente de la iluminación y q_{ri}^{l} es la radiación de onda larga intercambiada, que comprende el intercambio radiante con el resto de cerramientos interiores y objetos en el interior del edificio.

El cálculo de estos flujos de radiación requiere realizar complejos balances, determinando previamente las radiosidades para la onda corta y la onda larga. Los fundamentos del método se expusieron en el apartado 3.

Los flujos de calor por conducción en las superficies externas en el instante considerado se expresan en función de la temperatura externa e interna de ese cerramiento en ese instante y de los flujos de calor y las temperaturas superficiales externas e internas en instantes anteriores, utilizando para ello los denominados coeficientes de la función de transferencia, es decir:

$$q_{cde}(t) = a_0 T_{se}(t) - b_0 T_{si}(t) + P$$

donde a_0, b_0 son coeficientes de la función de transferencia y P es un polinomio asociado a las temperaturas y flujos de calor en instantes anteriores.

A partir de la ecuación del balance de energía sobre cada superficie exterior y utilizando esas expresiones basadas en los coeficientes de la función de transferencia, se obtiene una expresiones de las temperaturas superficiales exteriores en el instante dado $T_{se}(t)$ en función de las temperaturas interiores en ese instante y de las temperaturas y flujos de calor en instantes anteriores.

Utilizando los coeficientes de la función de transferencia se hace algo similar para los flujos de calor en las superficies internas, obteniéndose para una superficie *i* genérica la siguiente expresión:

$$q_{cdi}(t) = b_0 T_{se}(t) - c_0 T_{si}(t) + Q$$

donde b_0 y c_0 son coeficientes de la función de transferencia y Q es un polinomio asociado a las temperaturas y flujos de calor en instantes anteriores.

Se sustituye la expresión que hemos obtenido anteriormente para $T_{se}(t)$ en esta expresión y nos resulta finalmente $q_{cdi}(t)$ en función de $T_{si}(t)$ y de las temperaturas y flujos de calor en instantes anteriores. Esta expresión del calor se lleva al balance de energía de la superficie interior correspondiente y de esta forma tendremos la ecuación del balance de energía en cada una de las superficies interiores en función de las temperaturas superficiales interiores. En un edificio con *N* cerramientos se tendrá así un sistema de *N* ecuaciones con *N* incógnitas, que son las temperaturas superficiales interiores en ese instante.

Pero el número total de incógnitas es $N+2$, ya que además de las $T_{si}(t)$ también es incógnita la temperatura del aire interior T_{ai} y la potencia térmica extraída o suministrada por el equipo de aire acondicionado *Pot*.

Podemos disponer de una ecuación adicional, mediante el balance de energía en el aire del edificio, resultando la ecuación:

$$\rho.c.V.\frac{dT_{ai}}{dt} = \sum A_i.h_{ci}(T_i - T_s i)$$
$$+ \rho.c\,\dot{V}_{Iv}(T_{ae} - T_{ai}) + Pot$$

donde V es el volumen del local, V_{Iv} es el caudal de infiltraciones y ventilación, Q_{fi} son los aportes de convección debidos a fuentes internas (ocupantes, iluminación y equipos) y *Pot* es la potencia térmica intercambiada con el equipo de aire acondicionado.

En definitiva tenemos un total de $N+1$ ecuaciones, N de ellas algebraicas y una diferencial, con $N+2$ incógnitas. Dejando de lado los aspectos matemáticos, hay tres maneras de resolver el problema:

1. Considerar la temperatura del aire interior constante y por tanto $dT_{ai}/dt=0$. Se resuelve un sistema de N ecuaciones algebraicas. Calculadas las T_{si} *(t)* para cada paso de tiempo (normalmente para cada hora), se calcula la potencia térmica intercambiada con el equipo de acondicionamiento.
2. Considerar $Pot=0$, con lo que la temperatura del aire T_{ai} se deja fluctuar libremente. Se resuelve el sistema de $N+1$ ecuaciones (N algebraicas y 1 diferencial) y se obtiene la variación de la temperatura del aire $T_{ai}(t)$.
3. La solución más completa consiste en añadir el conjunto de ecuaciones que caracterizan el comportamiento térmico del sistema de acondicionamiento.

5.5. Transporte de humedad a través de los cerramientos

La humedad es causa y efecto de numerosas patologías en la construcción que pueden hacer disminuir el confort, poner en peligro la salud de los usuarios, aumentar el consumo de energía en el edifico y disminuir su durabilidad.

El mal comportamiento de un edificio frente a la humedad da lugar a un incremento en el consumo de energía. Se estima que un diseño erróneo de la envolvente desde el punto de vista de la humedad podría dar lugar a un incremento en el consumo de energía frente a un edificio correctamente diseñado de un 10%.

La humedad afecta también a la calidad del aire interior y a la salud de los ocupantes. Las altas humedades y condensaciones en las superficies internas pueden dar origen al desarrollo de mohos que además de la degradación estética que suponen, pueden ocasionar diversas enfermedades.

Además, la condensación intersticial y la acumulación de humedad en las estructuras pueden conducir a un serio deterioro en la integridad y prestaciones de los materiales y a una degeneración estructural del cerramiento del edificio, como consecuencia de la congelación del contenido de agua y la cristalización de las sales que contiene.

El movimiento de la humedad a través de los materiales de construcción porosos es un fenómeno complejo, en el que tiene lugar un transporte capilar, tanto en forma de agua líquida como de vapor. La modelización del transporte de humedad juega un papel fundamental en la prevención de los problemas que origina. El objetivo es describir el flujo de calor, aire y humedad a través de la envolvente del edificio [18].

Con el fin de describir de forma elemental estos mecanismos vamos a considerar los distintos tipos y orígenes de la humedad en un edificio.

• *Humedad de obra*

El agua es utilizada intensamente en una obra, en especial del tipo tradicional de construcción húmeda, con base estructural de hormigón y mortero en los acabados. Una vez cumplido su objetivo, el exceso de agua debe evaporarse, hasta que el material alcance la humedad de equilibrio con el ambiente que le rodea.

Este proceso de evaporación necesita periodos prolongados, muchas veces incompatibles con los tiempos de ejecución y entrega marcados y además la humedad queda confinada entre acabados superficiales, frecuentemente menos permeables, lo que dificulta su evaporación al ambiente. Teniendo en cuenta que en la dosificación del hormigón para su hidratación y fluencia, la proporción agua/cemento oscila alrededor de 0,4, la cantidad de agua de obra a evacuar es muy importante.

• *Humedad capilar*

Es el agua del terreno donde se asienta el edificio, que tiende a equilibrarse con el medio ambiente a través del propio contacto físico. Asciende por la red de los capilares de los paramentos hasta alturas que dependerán del tamaño de estos capilares, de su forma y estructura, de la presión atmosférica e incluso del potencial eléctrico del muro respecto a la fuente de agua.

• *Humedad de condensación*

Tiene su origen en el cambio de estado de parte del vapor de agua contenido en el aire, que se encuentra o se genera en los edificios, sobre las superficies interiores de los paramentos o en el interior de los mismos. La condensación se puede producir por dos fenómenos:

- Por un incremento de la cantidad de vapor de agua del ambiente, sin modificación significativa de la temperatura del aire. Esto genera un aumento de la humedad relativa, comenzando la condensación al alcanzarse la presión de saturación.
- Por un descenso de la temperatura, aun sin variar el contenido de vapor de agua en el aire, lo que producirá de igual modo un aumento de la humedad relativa, iniciándose la condensación al alcanzarse la temperatura de rocío.

Si la condensación se produce en la superficie de un cerramiento se denomina condensación superficial y si ocurre dentro de éste se denomina condensación intersticial.

• *Humedades de filtración*

Aparecen en fachadas y cubiertas y son el resultado directo de la absorción de agua de lluvia que penetra a través de las estructuras macroporosas de los paños opacos en general, o de juntas constructivas abiertas. Esta entrada es impulsada por una presión hidrostática, debida al efecto combinado de la lluvia, el viento y la fuerza gravitatoria, cuando su escorrentía se ve dificultada o impedida formando embalsamientos de agua.

Se suele manifestar en salientes de fachadas, aleros y en arranques de muros y zócalos expuestos a salpicaduras. Se produce también a menudo en juntas constructivas, en los encuentros de distintos materiales y en especial en la unión de muros con carpinterías. Se localiza usualmente en terrazas y balcones.

• *Humedad accidental*

Es la humedad que se produce como consecuencia de la avería en algún conducto de alimentación de agua presurizada, ya sea fría o caliente. Estos conductos están en general empotrados en muros y tabiques o sobre los forjados, donde una eventual pérdida resulta difícil de detectar si no es importante.

También los desagües pluviales o de aguas residuales a presión atmosférica pueden encontrarse embebidos en las paredes, suspendidos sobre placas de falsos techos o enterrados bajo el nivel del suelo y próximos a los cimientos. Mención especial se merecen las entradas súbitas de agua por avenidas o inundaciones.

5.6. Conclusiones

Este apartado pretende ser una exposición de los mecanismos de transmisión de calor en diferentes tipos de cerramientos. Se ha comenzado considerando elementos de doble envolvente, que entran dentro de lo que se entiende como elementos bioclimáticos.

Si bien estos elementos especiales han estado presentes en la construcción de edificios durante décadas, y se han mostrado efectivos en la reducción de la demanda energética, sin embargo, todavía existe cierta incertidumbre en la cuantificación de los ahorros energéticos que pueden aportar.

A continuación se ha descrito el comportamiento térmico de una cubierta ajardinada, en la parte novedosa de la misma. Se ha visto el importante efecto de la evapotranspiración en el valor del coeficiente de convección-radiación, de manera que para que una cubierta ajardinada trabaje como tal es muy importante asegurar la humedad en la misma.

A modo de resumen final se presentan los fundamentos del cálculo de la demanda de energía en un edificio a través de los balances de energía en las superficies exteriores e interiores, así como en el aire del edificio. Debido a la inercia de los cerramientos opacos, el cálculo de la transmisión de calor por conducción a través de ellos requiere resolver la ecuación de transmisión en régimen no estacionario, de manera que en este apartado se ha hecho alusión al método basado en los coeficientes de la función de transferencia.

Por último, no hemos querido finalizar el capítulo sin hacer una descripción de los mecanismos que intervienen en el transporte de humedad en los edificios, debido a su repercusión en la demanda de energía, así como en la calidad del aire interior, en la estética y en la duración de los materiales. Para ello se han considerado los orígenes diversos de esa humedad y se ha hecho una breve descripción de su modo de transporte.

6. Conclusiones del capítulo

La transmisión de calor en edificios está basada en unos principios conocidos desde hace muchos años. La ecuación de Fourier para la conducción del calor en paredes, que es el punto de partida, se estableció en 1822, e igualmente los fundamentos de la convección y radiación se fijaron a lo largo del siglo XVIII, como también unos años más tarde, los fundamentos de la termodinámica.

Sin embargo, un tercio o más del consumo de energía en los países industrializados se utiliza para crear unas condiciones de confort térmico en el interior de los edificios. En la U.E. ese consumo de energía llega a suponer un 40 % del consumo total.

Pues bien, este capítulo trata de presentar los fundamentos que rigen los mecanismos de transmisión de calor en el contexto de los edificios. Se presentan los fundamentos, se describe el comportamiento térmico de cerramientos opacos y semitransparentes, definiendo conceptos tan importantes como el de transmitancia térmica y factor solar, y se presentan los fundamentos del cálculo de la demanda energética de un edificio.

Además de los principios básicos, se presentan algunos modelos específicos relacionados con situaciones reales de cerramientos de edificios. El capítulo es en definitiva, un intento de considerar los factores que determinan la respuesta térmica de los edificios, en relación con su diseño y con los materiales de construcción utilizados.

Glosario

Absortividad: la fracción de la radiación absorbida por una superficie respecto de la radiación incidente.
Calor extraído (añadido): es la cantidad de calor eliminado (suministrado) realmente por el sistema de climatización.
Carga térmica: la cantidad de calor que hay que suministrar (calefacción) o extraer (refrigeración) para mantener la temperatura y humedad del aire de dicho espacio constante e igual a un valor previamente fijado
Conductividad térmica: propiedad de los materiales que refleja su capacidad para conducir el calor.
Demanda térmica: la integral de las cargas térmicas a lo largo del tiempo del edificio o de la zona considerada.
Emisividad: es una propiedad radiante que refleja la

relación entre la radiación emitida por la superficie (gris) a una temperatura dada y la radiación emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura.
Factor de forma entre dos superficies: es la fracción de radiación que sale de una superficie y llega directamente a la otra.
Factor solar de una ventana: representa la radiación solar que penetra al interior del edificio a través de la ventana, una parte de forma directa y la otra después de haber sido absorbida en el vidrio y el marco.
Ganancias (pérdidas) térmicas: los flujos de calor que entran (salen) del volumen de control definido por los límites físicos establecidos.
Infiltraciones: entradas y salidas de aire en el edificio no controladas, debidas a la permeabilidad de la envolvente.
Muros parietodinámicos: muros de doble hoja en los que la circulación del aire es del exterior al interior.
Muros Trombe: muros de doble hoja, en los que la circulación del aire es del interior al interior.
Poder de emisión del cuerpo negro: es la integral de la radiación emitida sobre todas las longitudes de onda por el emisor ideal (cuerpo negro).
Radiosidad: es la energía total de radiación que sale de una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área.
Reflectividad: la fracción de la radiación reflejada por una superficie respecto de la radiación incidente.
Sistema cerrado: aquel que tiene una masa constante, por tanto, está limitado por una superficie impermeable.
Solicitaciones: causas que originan los flujos de calor que modifican el estado térmico del aire del edificio.
Transmisividad: la fracción de la radiación transmitida respecto a la radiación incidente.
Transmitancia térmica de un cerramiento: es la inversa de la resistencia térmica total, habiendo tomado para los coeficientes superficiales de convección-radiación valores normalizados.
Ventilación: caudal de aire controlado.
Volumen de control: Sistema abierto, que intercambia masa con el exterior a través de las secciones de entrada y salida.

Bibliografía

[1] Y. A. Cengel, Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico, McGraw-Hill, 2007.
[2] Y. A. Cengel, M.A. Boles, Thermodynamics- An Engineering Approach, McGraw-Hill, 2006.
[3] S. Alvarez, Análisis dinámico del comportamiento térmico de edificios, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 1986.
[4] H.Hens, Heat, Air and Moist transfer in highly insulated building envelopes, Summary Report IEA EXCO ECBCS Annex 24, ESSU, 24 pags. 2001.
[5] Carrier Air Conditioning Co, Manual de Aire Acondicionado, Marcombo Boixareau, 1996.
[6] P.J. Schneider, Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley Publ. Co., 1958.
[7] J.P. Holman, Transferencia de Calor, 8ª edición, McGraw-Hill, 1998.
[8] R.Siegel, J.R.Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, Hemisphere, 1992.
[9] American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Handbook of Fundamentals, ASHRAE, 2010.
[10] W.M. Edmunds, Residential Insulation, ASTM Standardization News.
[11] P.W.O'Callaghan, Building for Energy Conservation, Pergamon Press, 1978.
[12] E. de Oliveira, J.E: Woods, A.P. Faist, Building Energy Management, Pergamon Press, 1981.
[13] W.H. Calrk, Análisis y gestión energética de edificios, McGraw-Hill, 1998.
[14] A.Ruiz, Ahorro energético mediante el uso de elementos de doble envolvente transparente-opaco, E.S. de Ingenieros de Sevilla, 2008.
[15] D Saelens, Energy performance assessment of single storey multiple-skin façades, U.C. de Lovaina, 2002.
[16] S. Furbo, L. J. Shah,U. Jordan (editorers), Solar Energy. State of the art, Internal Report, BYG. DTU SR-03-14, Universidad Técnica de Dinamarca DTU, 2003.
[17] AICIA- Grupo de Termiotecnia, Herramienta de Cálculo de la Demanda Energética. Manual de Fundamentos Teóricos, Ministerio e Fomento, 2001.
[18] J.A. Millán, Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica de los Cerramientos y en la Demanda Energética de los Edificios, Universidad País Vasco, 2010.

Fundamentos de ventilación natural en edificios

Fundamentals of Natural Ventilation in Buildings

Manuel Ruiz de Adana Santiago [a*]

[a] *Dr. Ingeniero Industrial. Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada, Área de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad de Córdoba*

Resumen

En este capítulo se introducen los fundamentos de la ventilación natural en edificios. Se presentan de forma básica los principios de la ventilación natural, y las fuerzas que inducen los flujos de aire: la fuerza debida al viento y la fuerza debida a diferencia de densidades. Se tratan en detalle las metodologías empleadas para calcular los caudales de ventilación debida al viento, debida a diferencia de densidades así como a la ventilación combinada. Se utilizan distintas metodologías de cálculo, basadas en modelos empíricos, modelos nodales o modelos basados en técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional, CFD. En cada caso, se desarrollan ejemplos para aclarar conceptos y demostrar su aplicación práctica. Se describen las estrategias empleadas en la ventilación natural de edificios desde sus fundamentos teóricos a la aplicación práctica, analizando algunos casos a estudio. Finalmente se analizan los criterios de diseño y se establecen directrices básicas de diseño en ventilación natural.

Palabras clave: Ventilación Natural, Ventilación debida al Viento, Ventilación debida a Diferencia de Densidades, Modelos de Cálculo, Estrategias de Ventilación

Abstract

This chapter introduces the fundamentals of natural ventilation in buildings. The basic principles of natural ventilation and the forces that induce air flows are presented: the wind force and the force due to density differences. Methods used to calculate the ventilation flows due to wind, due to density differences and the combined ventilation are discussed in detail. Different methods of calculation, based on empirical models, nodal models or models based on techniques of Computational Fluid Dynamics, CFD, are used. In each case, examples are developed to clarify concepts and demonstrate their practical application. Natural ventilation strategies in buildings are described from its theoretical to the practical application, analyzing some particular cases studies. Finally, the design criteria are analyzed and the basic guidelines for natural ventilation design are established.

Keywords: Natural Ventilation; Natural Ventilation due to Wind, Natural Ventilation due to Density Differences, Calculation Models, Ventilation Strategies

1. Introducción

La ventilación es el mecanismo mediante el que se proporciona aire limpio, normalmente aire exterior, a un espacio. El aire de ventilación es necesario para diluir y retirar los contaminantes emitidos por fuentes internas, debidas al metabolismo y actividades de los ocupantes. La ventilación representa sólo un término en la ecuación de calidad de aire del edificio, y debe emplearse una vez se han reducido las fuentes contaminantes evitables. Por tanto, la ventilación resulta esencial para mantener el confort y la salud de los ocupantes.

La ventilación natural puede emplearse también en determinadas zonas climáticas para enfriamiento del edificio, aplicando técnicas de ventilación nocturna.

La ventilación natural utiliza las fuerzas naturales debidas al viento y a la diferencia de temperaturas entre el edificio y su entorno para transportar el aire limpio del exterior hacia los espacios interiores del edificio. Ambos mecanismos naturales se fundamentan en el principio del movimiento del aire desde zonas de alta presión a zonas de baja presión. Las fuerzas naturales generan pequeñas diferencias de presión, del orden de Pascales. Por tanto, las estrategias de ventilación deben tener en cuenta el diseño de los huecos y aperturas existentes en el edificio para

* manuel.ruiz@uco.es

Citar como: Ruiz de Adana Santiago, M. (2012). Fundamentos de ventilación natural en edificios. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 63 – 96). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

ajustarse a las necesidades de ventilación que exista en cada caso.

Dado que las fuerzas naturales de las que depende la ventilación natural son, en ocasiones, poco predecibles, algunos sistemas de ventilación natural se integran con los sistemas mecánicos de los edificios, en los denominados sistemas de ventilación híbrida.

De acuerdo con la normativa vigente en el ámbito de edificios [1], la ventilación natural está permitida siempre y cuando se garanticen los caudales mínimos exigidos. La solución, en muchos casos, consiste en emplear la ventilación híbrida según las condiciones de presión y temperatura existentes, empleando ventilación natural cuando las condiciones son favorables y ventilación híbrida cuando son desfavorables.

En este capítulo, se abordan exclusivamente los fundamentos de ventilación natural y su potencial para uso en edificios. Se analizan los conceptos relacionados con las fuerzas naturales debidas al viento así como a la diferencia de densidades. En cada caso, se estudian los modelos de cálculo así como los empleados en la ventilación combinada. El capítulo aborda las estrategias empleadas para implementar las técnicas de ventilación en los edificios. Se desarrollan distintos ejemplos prácticos y casos a estudio con el objetivo de facilitar la comprensión de los fundamentos de la ventilación natural en edificios.

2. Ventilación natural debida al viento

El viento es una de las dos fuerzas naturales que aprovechan las técnicas de ventilación natural. El movimiento del aire en la superficie terrestre es un fenómeno complejo gobernado por variables como la rotación de la tierra, las diferencias de temperatura entre océanos, polos y tierra, localización geográfica así como la orografía de la zona.

2.1. Características del viento

El viento típicamente es variable en dirección y magnitud, turbulento y su velocidad varía con la altura sobre el suelo. La turbulencia del viento en la parte baja de la atmósfera es debida al terreno y a corrientes térmicas. La velocidad instantánea del viento, varía con el tiempo de forma aleatoria, oscilando en torno a un valor medio, como ilustra la figura 1.

La velocidad del viento en cada instante de tiempo puede escribirse como la suma del valor medio y la componente que fluctúa:

$$V(t) = \bar{V} + v(t) \quad [1]$$

Donde $V(t)$ es la velocidad del viento instantánea, $\bar{V}$ es el valor medio y $v(t)$ es la componente que fluctúa en el tiempo.

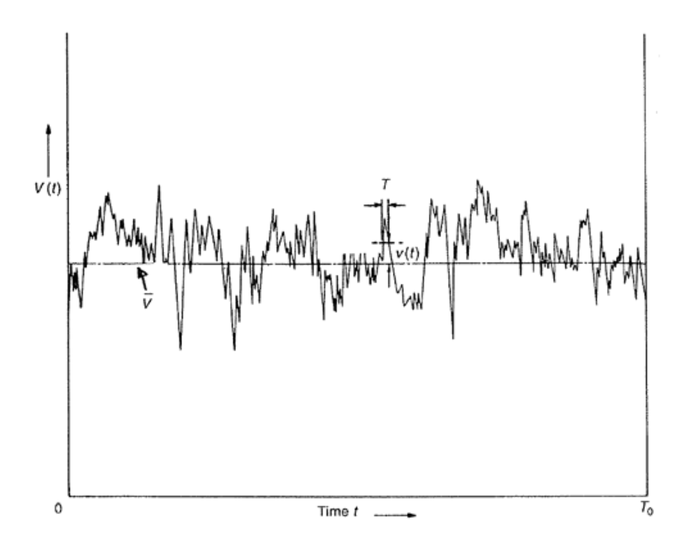


Fig. 1. Registro típico de velocidad de viento frente al tiempo [2].

El valor promedio de $v(t)$ en un intervalo de tiempo razonablemente largo es cero. Una medida de la turbulencia del viento viene dada por la desviación estándar:

$$\sqrt{\overline{v^2(t)}} \quad [2]$$

El valor medio de la velocidad del viento se obtiene integrando el valor instantáneo en el periodo de tiempo deseado, t_o:

$$\bar{V} = \frac{1}{t_o}\int_0^{t_0} V(t)\,dt \quad [3]$$

La intensidad de turbulencia, TI, se define como el cociente de la desviación estándar y el valor medio:

$$TI = \frac{\sqrt{\overline{v^2(t)}}}{\bar{V}} \quad [4]$$

La intensidad de turbulencia es uno de los parámetros que caracteriza al viento. El valor de la velocidad media empleado debe ser independiente del periodo de tiempo que se considere. En la zona baja de la atmósfera la velocidad media debe promediarse durante periodos comprendidos entre 10 min y 2 h [2].

2.2. Datos meteorológicos de viento

Para la determinación del potencial de ventilación natural debida al viento es necesario analizar los registros de viento existentes en cada localidad. Para ello, es necesario consultar los datos de los servicios

meteorológicos de cada zona. A modo de ejemplo puede consultarse [3]. Los registros de viento se suelen tomar en postes de medida normalizados con el registro de velocidad medido a 10 m de altura. Los valores registrados son promediados en el tiempo, típicamente a intervalos de 10 minutos. La presentación de datos de viento se realiza en formato de tabla, gráficos o mapas de viento. La figura 2 muestra un mapa de viento para Europa [4].

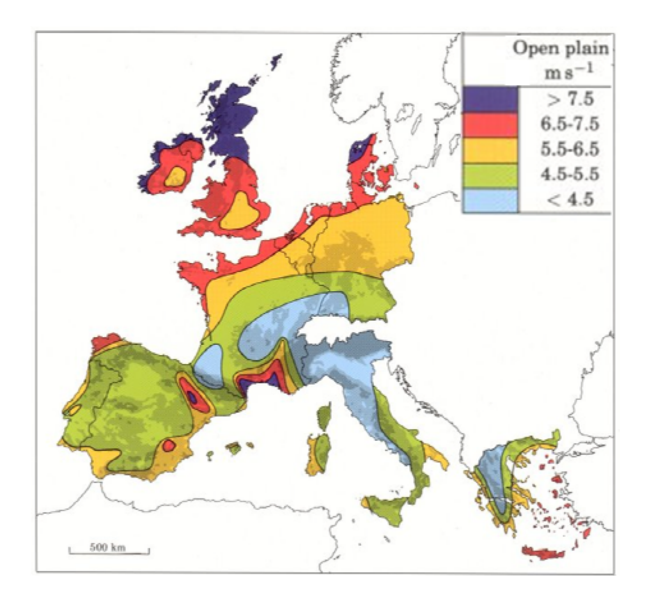


Fig.2. Mapa de viento en Europa [4].

2.3. Viento, suelo y perfil de velocidades

Debido a la condición de no-deslizamiento, el aire en contacto con el terreno tiene una velocidad cero. Este efecto se produce en cualquier fluido que esté en contacto con un sólido y es debido a los efectos viscosos. Este fenómeno es responsable de la generación de esfuerzos cortantes y el desarrollo de la capa límite y depende de la viscosidad del fluido y de las características del terreno.

Por tanto, al estar en contacto el aire con la superficie terrestre se establece un perfil de velocidades. La velocidad del viento varía desde el valor cero en el suelo hasta un valor de velocidad a una determinada altura, figura 3. La variación de la velocidad respecto a la altura desde el suelo tiene un perfil logarítmico.

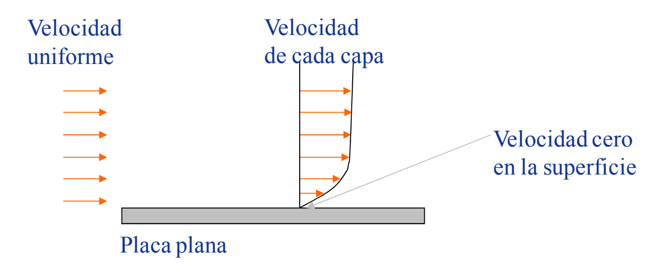


Fig.3. Condición de no deslizamiento.

El perfil de velocidades depende de la naturaleza del terreno y varía según se trate de un entorno en el centro de la ciudad, un entorno urbano o un entorno en campo abierto, tal y como se muestra esquemáticamente en la figura 4.

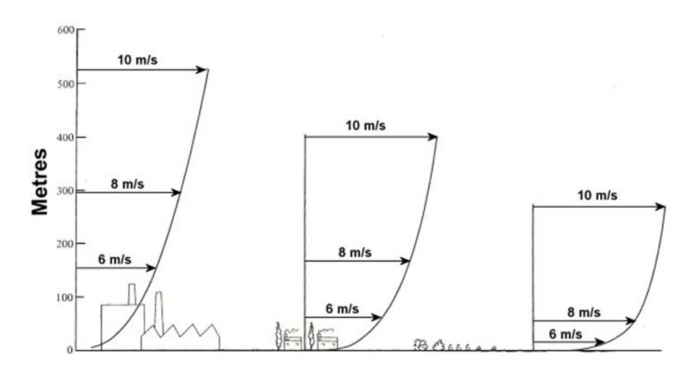


Fig.4. Perfil de velocidad de viento en entorno de ciudad, urbano y en campo abierto [5].

Los perfiles de velocidad medios pueden obtenerse mediante ecuaciones a partir de los datos de viento registrados a una determinada altura. Distintos estándares y organismos internacionales establecen correlaciones para su determinación. Una de las correlaciones más sencillas para determinar el perfil de velocidades corresponde a la norma BS5925 [6]:

$$\frac{\overline{V}}{\overline{V}_r} = c\,H^a \qquad [5]$$

Donde $\overline{V}$ es la velocidad media del viento a cualquier altura, $\overline{V}_r$ es la velocidad del viento de referencia, medida a una altura conocida, por defecto a 10 m, H es la altura en metros; a y c son constantes que dependen del tipo de terreno cuyos valores se recogen en la tabla 1.

Tabla 1
Valores de las constantes a y c [6]

Terreno	c	a
Campo abierto	0,68	0,17
Urbano	0,35	0,25
Ciudad	0,21	0,33

A modo de ejemplo la figura 5 muestra la diferencia de los perfiles de velocidad en cada caso de acuerdo con el BS5925 [6], para una velocidad de viento registrada de 5 m/s a 10 m de altura. Puede observarse que el perfil de velocidad con los valores más elevados corresponde al caso de campo abierto mientras que los valores más bajos al caso de centro de ciudad.

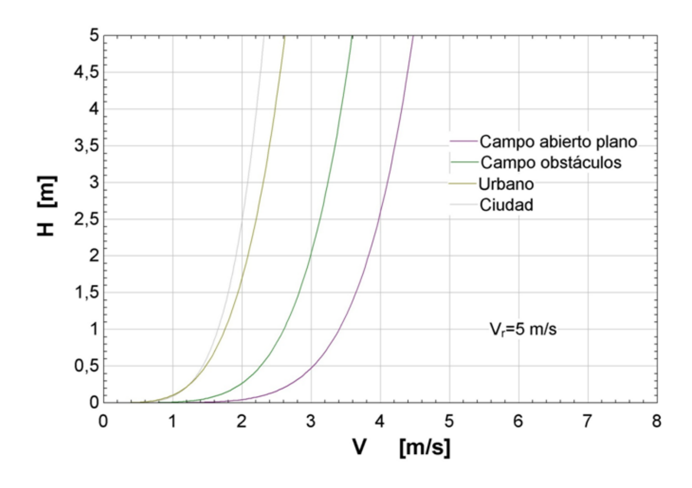


Fig.5. Perfil de velocidad de viento, según BS5925 [6].

Otra correlaciones habitualmente empleadas para la determinación del perfil de velocidades corresponden al método de LBL [7]:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_r} = \frac{\alpha (H/10)^{\gamma}}{\alpha_r (H_r/10)^{\gamma_r}} \qquad [6]$$

y al método propuesto por ASHRAE [8]:

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_r} = \frac{\delta_r^{\beta_r} (H)^{\beta}}{\delta^{\beta} (H_r)^{\beta_r}} \qquad [7]$$

donde α, γ, β y δ son constantes dependientes del tipo de terreno donde esté el edificio; α_r, γ_r, β_r y δ_r son constantes dependientes del tipo de terreno donde esté la estación meteorológica que registra los datos de velocidad. Los valores de todas estas constantes se recogen en la tabla 2.

Tabla 2
Valores de las constantes α, γ, β y δ [7 y 8]

Terreno	α	γ	β	δ
Campo abierto	1	0,15	0,1	210
Urbano	0,67	0,25	0,22	370
Ciudad	0,47	0,35	0,33	460

Los resultados de perfil de velocidades varían ligeramente de un método a otro. A título de ejemplo la figura 6 ilustra el perfil de velocidades para el caso de terreno urbano con valores de $\bar{V}_r$ de 5 m/s y H_r de 10 m. Se observan resultados similares en el método BS5925 y el método ASHRAE.

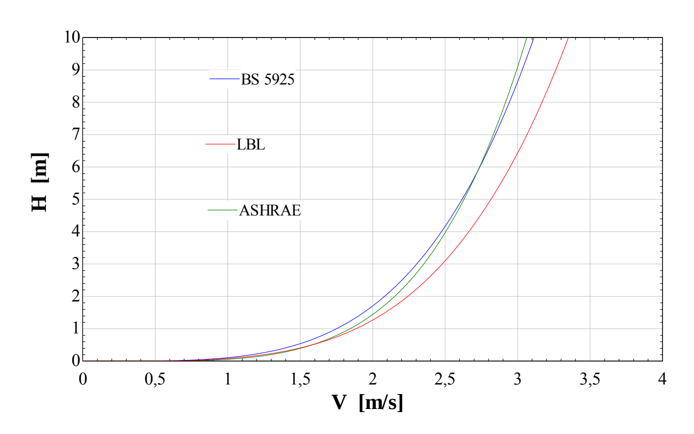


Fig.6. Perfil de velocidad de viento, según BS5925 [6], LBL [7] y ASHRAE [8].

2.3.1. *Ejercicio práctico 1.Perfil de velocidades del viento*



Fig.7. Esquema correspondiente al ejercicio práctico 1.

Enunciado: una estación meteorológica está situada a una altura de 10 m en campo abierto. La estación registra una velocidad media de 5 m/s. Determinar la velocidad del viento existente en una ventana de un edificio situado en un entorno urbano que se encuentra a 8 m de altura, suponiendo que no existen obstáculos en torno al edificio. Véase figura 7.

Solución: se identifican los siguientes datos: altura H igual a 8 m; altura de referencia H_r igual a 10 m; velocidad media registrada $\bar{V}_r$ igual a 5 m/s.

El tipo de entorno tanto del edificio como de la estación meteorológica permite definir los parámetros de las correlaciones. Por una parte los correspondientes a entorno urbano: $a = 0,25$ y $c = 0,35$; $\alpha = 0,67$ y $\gamma = 0,25$; $\beta = 0,22$ y $\delta = 370$. Y por otra parte los correspondientes a campo abierto: $\alpha_r = 1$, $\gamma_r = 0,15$; $\beta_r = 0,10$ y $\delta_r = 210$.

Sustituyendo estos datos en las ecuaciones correspondientes a los métodos BS, LBL y ASHRAE se obtiene el valor de velocidad media estimado por cada método:

$\bar{V}_{BS} = 2,94\, m/s$
$\bar{V}_{LBL} = 3,17\, m/s$
$\bar{V}_{ASHRAE} = 2,92\, m/s$

Obsérvese la pequeña diferencia existente entre los métodos BS y ASHRAE. Obsérvese también que el método BS asume que la estación meteorológica está situada siempre en campo abierto, por lo que en casos donde no sea así, es necesario emplear alguno de los otros métodos para obtener un resultado aceptable.

2.3.2. *Ejercicio práctico 2. Perfil de velocidades del viento*

Enunciado: estimar la velocidad de viento incidente durante un día completo a intervalos de 10 minutos en una vivienda situada en Noain (Pamplona) que tiene 5 m de altura.

Solución: se descargan datos de velocidad de viento de referencia [2] correspondientes a la estación meteorológica de Aemet situada en Noain (Pamplona). Los datos disponibles corresponden a registros de velocidad promediados a intervalos de 10 minutos. Se verifica que la estación meteorológica está situada a 10 m de altura en campo abierto. Por tanto, $\alpha_r = 1$, $\gamma_r = 0,15$; $\beta_r = 0,10$ y $\delta_r = 210$. Por otra parte, la vivienda se considera situada en un entorno de ciudad: $a = 0,33$ y $c = 0,21$; $\alpha = 0,47$ y $\gamma = 0,35$; $\beta = 0,33$ y $\delta = 460$. La figura 8 representa los datos correspondientes a un día concreto, a lo largo de un periodo de 24 horas.

Se observa que los resultados siguen el perfil de viento registrado a 10 m con un orden de magnitud inferior en todos los casos, debido al perfil de velocidad existente en función del tipo de entorno de la vivienda considerada.

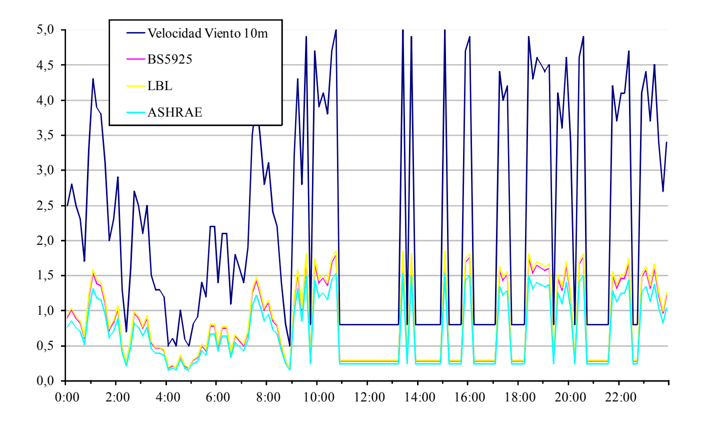


Fig.8. Resultados del ejercicio práctico 2. Velocidad de viento, en m/s, a 8 m de altura en Noain (Pamplona) para un día concreto, estimados mediante 3 métodos: BS, LBL y ASHRAE.

2.4. Caracterización del flujo de aire a través de aperturas

La envolvente de un edificio presenta aperturas de distinto tamaño a través de las cuales se produce un flujo de aire. El flujo de aire se establece en función de la diferencia de presiones entre ambas caras, debido al viento y/o a la diferencia de densidades.

Las pequeñas aperturas, inferiores a 10 mm, corresponden típicamente a juntas de ventanas, puertas y pasamuros de instalaciones. El flujo de aire a través de pequeñas aperturas suele ser de tipo laminar. Este flujo de aire suele ser no deseado, en cuyo caso se denomina infiltraciones o exfiltraciones de aire.

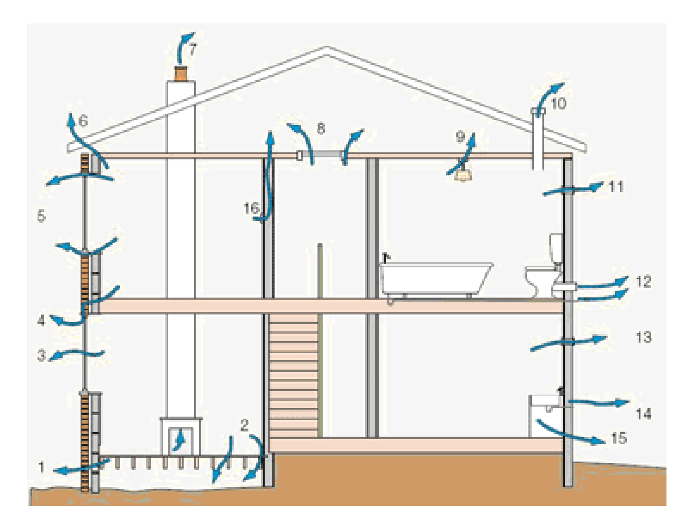


Fig.9. Flujos de aire en un edificio por pequeñas aperturas [9].

Las aperturas grandes, superiores a 10 mm, corresponden habitualmente a huecos en fachada como ventanas y rejillas. El flujo de aire a través de grandes aperturas suele ser de tipo turbulento. En el diseño de las estrategias de ventilación natural es necesario caracterizar el flujo de aire a través de grandes aperturas. Este flujo de aire es proporcional a la diferencia de presión en ambas caras y queda caracterizado por:

$$Q = C_d\, A \sqrt{\frac{2\,\Delta P}{\rho_o}} \qquad [8]$$

Donde Q es el caudal de aire, en m^3/s; C_d es el coeficiente de descarga; A es el área de la apertura, en m^2; ΔP es la diferencia de presión, en Pa; y ρ_o es la densidad aire a la temperatura de referencia, en kg/m^3. El coeficiente de descarga, C_d, varía en función de la diferencia de temperaturas con valores comprendidos entre 0,65 y 0,78. También varía en función de la geometría de la apertura. Para pequeñas aperturas tiene valores en torno a 0,65 mientras que para grandes aperturas su valor se aproxima a la unidad. En la práctica, a falta de valores exactos se asume un valor medio para grandes aperturas de 0,61 [10].

2.4.1. Ejercicio práctico 3. Flujo de aire a través de grandes aperturas

Enunciado: un local de dimensiones de 10 m de largo 10 m de ancho y 4 m de altura tiene una ventana de 0,4 m de ancho y 0,5 m de altura. Considerando una diferencia de presión interior-exterior de 1 Pa, determinar el flujo de aire debido a ventilación natural por viento así como las renovaciones de aire a la hora. Tómese una valor de 0,61 para el coeficiente de descarga.

Solución: se identifican los siguientes datos: volumen V igual a 400 m^3; área de apertura A igual a 0,2 m^2; coeficiente de descarga C_d igual a 0,61; diferencia de presión ΔP igual a 1 Pa. La densidad del aire a temperatura ambiente, ρ se considera igual a 1,2 kg/m^3.

Sustituyendo estos datos en la ecuación del caudal de aire para grandes aperturas se obtiene un valor de 0,157 m^3/s, es decir, 567 m^3/h. Dividiendo éste último valor entre el volumen del local se obtiene un valor de 1,4 h^{-1} renovaciones de aire a la hora en el local.

Obsérvese que el cálculo se ha realizado para un valor de diferencia de presión unitario de 1 Pa. En la práctica, los valores de diferencia de presión debidos al viento son más elevados por lo que el potencial de ventilación a través de grandes aperturas es significativo. El control de estos flujos permite definir con detalle la estrategia de ventilación más adecuada en cada caso.

2.5. Presión debida al viento

El viento que incide sobre un edificio genera una zona de sobrepresión en la fachada de barlovento y una zona de baja presión en la fachada de sotavento. La distribución de estas presiones sobre la fachada del edificio determina el flujo de aire debido al viento a través de las aperturas existentes.

La estimación de los caudales de aire requiere determinar previamente la presión debida al viento. El valor promediado en el tiempo de la presión estática debida al viento viene dada por:

$$P_w = 0,5 C_p \rho_o \overline{V}^2 \qquad [9]$$

Donde P_w es el valor de la presión debida al viento, en Pa; C_p es el coeficiente de presión; ρ_o es la densidad aire a la temperatura de referencia, en kg/m^3; $\overline{V}$ es el valor medio de la velocidad de viento a la altura de la apertura o hueco, en m/s.

El coeficiente de presión depende de la geometría del edificio, la velocidad y la dirección del viento y de la localización del edificio, topografía y rugosidad del terreno. El valor del coeficiente de presión se determina mediante:

$$C_p = \frac{P - P_o}{P_d} \qquad [10]$$

Donde P es la presión estática debida al viento en cada punto de la fachada de un edificio, en Pa; P_o es la presión estática de referencia, en Pa; y P_d es la presión dinámica, en Pa, cuyo valor depende de la velocidad media del viento:

$$P_d = 0,5 \rho_o \overline{V}^2 \qquad [11]$$

El coeficiente de presión puede obtenerse a partir de túneles de viento en modelos a escala [11], mediciones en edificios reales [12] o simulaciones por CFD [13]. A modo de ejemplo, la figura 10 muestra los valores del coeficiente de presión medidos en la fachada de un edificio donde incide el viento con un ángulo de 45º. Puede comprobarse que el coeficiente de presión local varía en la misma fachada de un punto a otro tanto en anchura como en altura. Por este motivo, en la práctica se suele emplear el valor del coeficiente de presión medio sobre cada fachada del edificio.

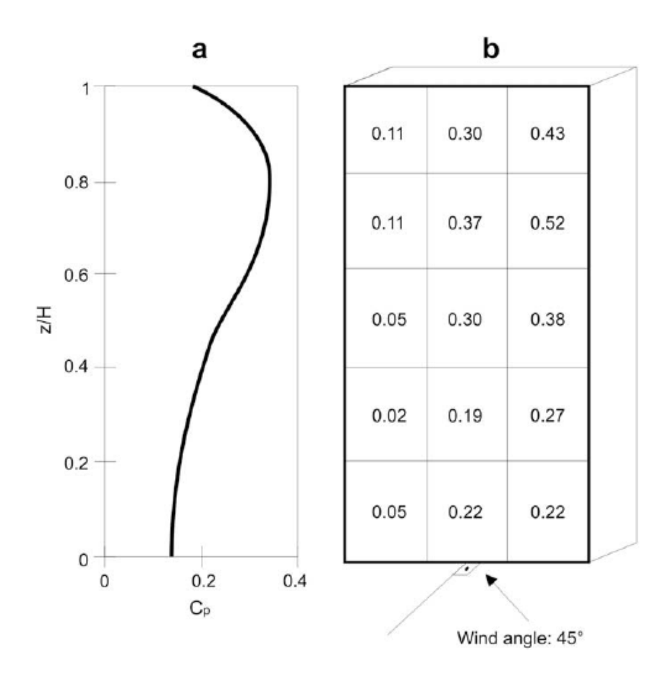


Fig.10. Ejemplo de a) perfil vertical del C_p medio sobre la fachada de un edificio de aire y b) distribución del C_p local sobre la superficie [14].

La obtención de los valores del coeficiente de presión medio se realiza a partir de mediciones en distintos puntos de la fachada y la cubierta de un edificio para distintos ángulos de incidencia de viento. La figura 11 muestra los valores medidos de coeficiente de presión local en edificios de baja altura en función del ángulo de incidencia del viento [15].

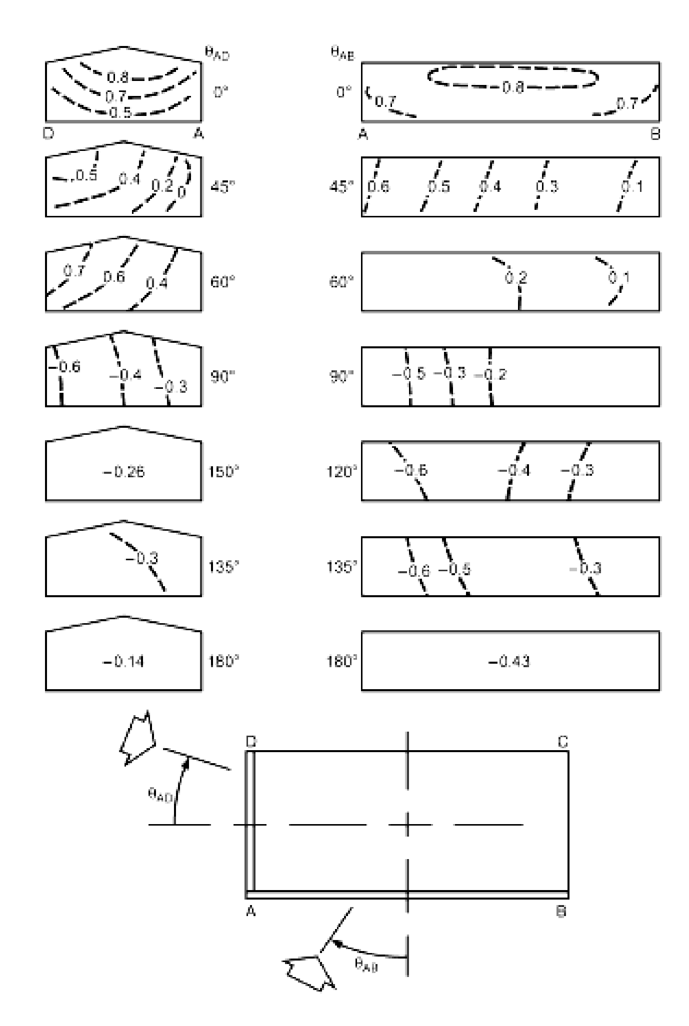


Fig.11. Ejemplo de coeficiente de presión local en edificios de baja altura en función de la dirección del viento para fachadas [15].

El coeficiente de presión local tiene valor positivo, en las zonas de sobrepresión y valor negativo en las zonas de depresión, es decir, valores de presión inferiores a la presión atmosférica. Distintos autores han realizado estudios para obtener valores del coeficiente de presión local medio a partir de los valores del coeficiente de presión local. La figura 12 recoge los resultados obtenidos del coeficiente de presión medio para edificios de baja altura en función del ángulo de incidencia del viento. En dicha figura la zona sombreada corresponde a la dispersión del 80% de los valores del coeficiente de presión local y la línea central corresponde con el valor medio. El valor medio tiene valores positivos para ángulo de incidencia inferiores a 60º y negativos para ángulos entre 60 y 180º.

Distintos autores [6, 9 y 17] han publicado datos del coeficiente de presión medio para distintas tipologías de edificios en función del ángulo de incidencia del viento. En la tabla 3 se recogen algunos datos del coeficiente de presión medio [9]. También se pueden obtener datos del coeficiente de presión medio mediante modelos de cálculo analíticos [16], implementados en software como CpCalc [18] o CpGenerator [19].

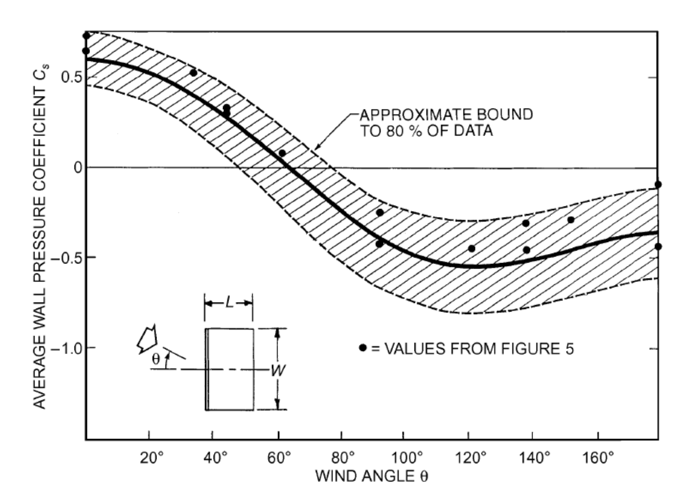
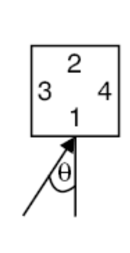


Fig.12. Variación del coeficiente de presión medio en edificios de baja altura en función de la dirección del viento [16].

Tabla 3
Valores del coeficiente de presión medio para edificios de baja altura (hasta 3 plantas) de planta cuadrada y en zona abierta sin obstáculos al viento. Extraído de [9]

Elemento		Ángulo del viento, θ		
		0º	45º	90º
Fachada 1		0,7	0,35	-0,5
Fachada 2		-0,2	-0,4	-0,5
Fachada 3		-0,5	0,35	0,7
Fachada 4		-0,5	-0,4	-0,2
Tejado con inclinación inferior a10º	Delante	-0,8	-0,7	-0,6
	Detrás	-0,4	-0,5	-0,6



La diferencia de presión debida al viento entre dos fachadas de un edificio sin divisiones internas y con aperturas en dos fachadas opuestas puede determinarse mediante:

$$\Delta P_w = 0,5\left(C_{p1} - C_{p2}\right)\rho_o \overline{V}^2 \qquad [12]$$

Donde C_{p1} y C_{p2} son los coeficientes de presión medio en cada fachada del edificio.

2.5.1. *Ejercicio práctico 4. Flujo de aire a través de aperturas en fachadas opuestas*

Enunciado: un edificio está situado en zona abierta sin obstáculos. El edificio tiene planta cuadrada de 10 m de arista y altura 12 m y presenta una apertura en la fachada cara al viento, barlovento, y otra en la fachada opuesta, sotavento. Cada apertura corresponde con una ventana abierta con un área de 0,5 m^2. La velocidad del viento media registrada por una estación meteorológica es de 5 m/s. La estación está situada en zona abierta y a una altura de 10 m. Suponiendo un coeficiente de descarga de 0,8 determinar el caudal de aire a través de las dos ventanas

abiertas situadas en fachadas opuestas del edificio, si el viento incide en dirección normal al plano de la fachada.

Solución: se identifican los siguientes datos: área de apertura A igual a 0,5 m^2; coeficiente de descarga C_d igual a 0,8. La densidad del aire a temperatura ambiente, ρ se considera igual a 1,2 kg/m^3.

En primer lugar, se determina la velocidad media del aire a la altura del edificio. Para ello podemos emplear cualquiera de los métodos expuestos. En este caso, por simplicidad se aplica el método BS5925. Dado que el edificio se encuentra en zona abierta, los valores de las constantes corresponden a c igual a 0,68 y a igual a 0,17. Empleando la ecuación 5, se obtiene, para 12 m de altura, una velocidad de 5,19 m/s.

En segundo lugar, se determina la diferencia de presión debida al viento entre ambas fachadas, sabiendo que el viento incide de forma normal y que el edificio se encuentra en zona abierta sin obstáculos, los valores de los coeficientes de presión pueden obtenerse de la tabla 3: C_{p1} es igual a 0,7 y C_{p2} es igual a -0,5. El área equivalente de apertura de dos áreas en serie se determina mediante $1/A_w^2 = 1/A_1^2 + 1/A_2^2$ resultando un valor de A_w de 0,4 m^2. Aplicando la ecuación 12 se obtiene una diferencia de presión, ΔP_w, de 19,37 Pa.

En tercer lugar, se determina el caudal de aire mediante la ecuación 8. Sustituyendo el valor de la diferencia de presión calculada, ΔP_w, el área equivalente de apertura, A_w, y el resto de valores conocidos se obtiene un caudal de aire, Q, de 1,61 m^3/s.

El ejemplo expuesto muestra la forma de determinar el flujo de aire debido a la acción del viento sobre un edificio con aperturas situadas en fachadas opuestas. Para otros ángulos de incidencia del viento, la metodología es la misma, pero se deben aplicar valores diferentes del coeficiente de presión. También se aplican coeficientes de presión diferentes si la localización del edificio corresponde a zona urbana o semiurbana.

Sin embargo, en aquellos casos en los que el edificio tenga aperturas localizadas en diferentes fachadas debe aplicarse el balance de masa a los flujos que entran y salen por cada apertura del edificio. Por ejemplo, para un edificio de planta cuadrada con una apertura en cada fachada, considerando que el aire entra por la apertura 1 y sale por las aperturas 2, 3 y 4, ver esquema de la tabla 3, se aplica el siguiente método de resolución. En primer lugar, se combinan las ecuaciones 8 y 12:

$$\left.\begin{aligned} Q &= C_d\, A\sqrt{\frac{2\,\Delta P_w}{\rho_o}} \\ \Delta P_w &= 0{,}5\left(C_{p1} - C_{p2}\right)\rho_o \overline{V}^2 \end{aligned}\right\} Q = C_d\, A\, \overline{V}\left(C_{p1} - C_{p2}\right)^{0,5} \qquad [13]$$

Se aplica el balance de masa a las entradas y salidas de aire por las aperturas, considerando un coeficiente de presión interna C_{pi} único para el interior del edificio:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$
$$C_{d1}\, A_1\, \overline{V}\left(C_{p1} - C_{pi}\right)^{0,5} = C_{d2}\, A_2\, \overline{V}\left(C_{pi} - C_{p2}\right)^{0,5} + \ldots \qquad [14]$$
$$\ldots + C_{d3}\, A_3\, \overline{V}\left(C_{pi} - C_{p3}\right)^{0,5} + C_{d4}\, A_4\, \overline{V}\left(C_{pi} - C_{p4}\right)^{0,5}$$

Simplificando términos y considerando áreas de igual apertura se obtiene:

$$\left(C_{p1} - C_{pi}\right)^{0,5} = \left(C_{pi} - C_{p2}\right)^{0,5} + \left(C_{pi} - C_{p3}\right)^{0,5} + \ldots \qquad [15]$$
$$\ldots + \left(C_{pi} - C_{p4}\right)^{0,5}$$

Donde la solución al valor de C_{pi} debe encontrarse mediante iteración numérica.

2.5.2. *Ejercicio práctico 5. Flujo de aire a través de aperturas en fachadas opuestas*

Enunciado: tomando los datos del ejercicio práctico 4 determinar el valor del coeficiente de presión interno, C_{pi}, la diferencia de presión entre el exterior y el interior. Comprobar que el caudal de aire puede determinarse empleando el coeficiente de presión interno.

Solución: se aplica la ecuación 15 para el caso de una entrada y una salida. Sustituyendo en 15 los valores del coeficiente de presión C_{p1} y C_{p2} determinados en el ejercicio anterior, se obtiene mediante iteración el valor del coeficiente de presión interior, C_{pi}, de 0,1.

Aplicando la ecuación 12 entre los puntos 1 e i, y sustituyendo los valores de C_{p1} igual a 0,7 y C_{pi}, igual a 0,1 se obtiene una diferencia de presión debida al viento entre la fachada 1 y el interior del edificio de 9,69 Pa. El mismo valor se obtiene si se aplica la ecuación 12 entre los puntos i y 2. Obsérvese que la suma de ambos valores corresponde a 19,37 Pa, que es el valor que se determinó en el ejercicio anterior como diferencia de presión entre ambas fachadas.

El caudal de aire se determina mediante la ecuación 8. Sustituyendo el valor de la diferencia de presión calculada, ΔP_w, el área de apertura de la ventana, A, y el resto de valores conocidos se obtiene un caudal de aire, Q, de 1,61 m^3/s. Se comprueba que el resultado es el mismo que el ejercicio anterior.

El método puede aplicarse a problemas de ventilación debido al viento en edificios con varias aperturas al exterior

o bien con particiones internas, en cuyo caso se determina el coeficiente de presión interna y la presión correspondiente a cada una de las divisiones o locales interiores en el edificio. También puede aplicarse en el caso de aperturas de diferente tamaño.

3. Ventilación natural debida a diferencia de densidades

La diferencia de temperaturas, y por tanto la diferencia de densidades, entre el aire interior y exterior de un edificio genera una diferencia de presión adicional a la del viento. La presión debida a diferencia de densidades del aire vienen dada por:

$$P_s = P_o - \rho g y \qquad [16]$$

Donde P_s es la presión debida a diferencia de densidades, en Pa; P_o es la presión a la altura de referencia, en Pa; ρ es la densidad del aire a la temperatura T, en kg/m^3; y es la altura medida desde el plano de referencia*, en m.

La variación de la densidad del aire con la temperatura produce gradientes de presión tanto en el interior como en el exterior del edificio. El gradiente vertical de presión debido a diferencia de densidades viene dado por:

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{dP}{dy} = -\rho g \\ Gas\,ideal: \rho T = \rho_o T_o\end{array}\right\} \quad \frac{dP}{dy} = -\rho_o g \frac{T_o}{T} \qquad [17]$$

Donde ρ_o es la densidad del aire a la temperatura T_o, en kg/m^3; y T es la temperatura del aire, en K. La figura 13 muestra el gradiente de presiones del aire debido a diferencia de densidades a dos temperaturas.

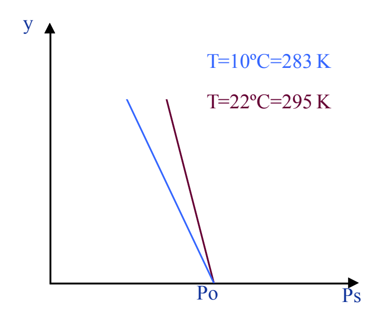


Fig.13. Gradiente de presiones del aire debido a diferencia de densidades.

Cuando la temperatura interior del edificio es mayor que la exterior, el aire frío exterior entra al edificio por la parte inferior a través de los huecos mientras que el aire caliente sale al exterior en la parte alta del edificio a través de los huecos.

Cuando la temperatura interior del edificio es menor que la exterior, la situación se invierte. La altura en la que se produce la transición entre el flujo de aire al exterior y el flujo de aire al interior del edificio se denomina altura del plano neutro. La figura 14 muestra el gradiente de presiones debido a diferencia de densidades y la altura de plano o nivel neutro de presiones en el caso de temperatura exterior inferior a la interior.

Debido a que la diferencia de presión del aire exterior-interior es mayor se produce un flujo de aire por la apertura inferior. En la apertura superior el flujo de aire va del interior al exterior, debido a la mayor diferencia de presiones entre el interior y exterior.

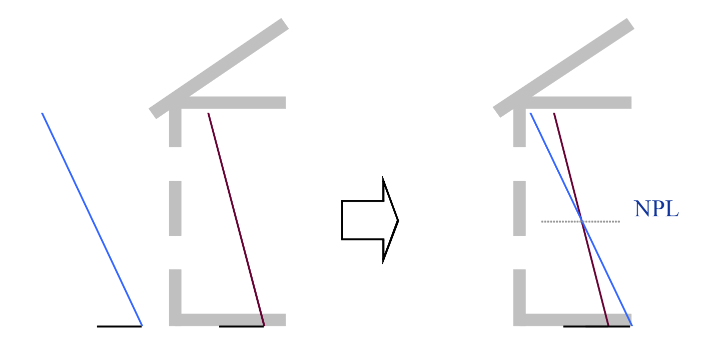


Fig.14. Gradiente de presiones del aire debido a diferencia de densidades.

3.1. Ejercicio práctico 6. Gradiente de presiones debido a diferencia de densidades

Enunciado: una vivienda de 6 m de altura mantiene unas condiciones interiores de 22ºC cuando las exteriores son de 10ºC. La vivienda tiene dos ventanas a 1,5 m y a 4,5 m del suelo. Determinar el gradiente de presiones interior y exterior, en Pa/m. En ausencia de viento, comprobar el flujo de aire a través de las dos ventanas, suponiendo plano neutro de presiones a 3 m.

Solución: se considera para el aire una densidad ρ_o de 1,2 kg/m^3 para una temperatura de referencia T_o igual a 293 K (20ºC); las temperaturas interior y exterior T_i y T_e se dan como dato; se aplica la ecuación 17 para determinar el gradiente de presión interior, que es de -11,69 Pa/m y el gradiente exterior que es de -12,19 Pa/m.

Considerando que el plano neutro está situado a 3 m, la cota de la ventana situada a 1,5 m es -1,5 m por tanto, la presión exterior es 18,28 Pa mientras que la presión interior es 17,54 Pa. La diferencia de presiones hará que se establezca un flujo de aire del exterior al interior.

En el caso de la ventana superior situada a 4,5 m, cota +1,5 m desde el plano neutro, la diferencia de presiones entre el interior y el exterior es de 0,74 Pa, por lo que se establece el flujo de aire del interior al exterior.

3.2. Presión debida a diferencia de densidades

La diferencia de presión debida a diferencia de densidades entre dos aperturas verticales separadas una distancia h viene dada por:

$$\Delta P_s = -\rho_o g \left(h_2 - h_1\right) T_o \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i}\right) \quad [18]$$

Donde ΔP_s es la diferencia de presión por diferencia de densidades, en Pa; ρ_o es la densidad aire a la temperatura T_o, en kg/m^3; $T_e - T_i$ la diferencia de temperaturas del aire exterior interior, en K; $h_2 - h_1$ la separación vertical entre aperturas, en m.

3.3. Estimación de caudal de aire por diferencia de densidades

Una vez conocida la diferencia de presión se determina el caudal de aire aplicando la ecuación 8. En dicha ecuación el área efectiva de la apertura puede determinarse en el caso de varias aperturas según se trate de aperturas en paralelo:

$$\left.\begin{aligned} A_{entrada} &= A_1 + A_2 \\ A_{salida} &= A_3 + A_4 \end{aligned}\right\} \quad \frac{1}{A_{ef}^2} = \frac{1}{\left(A_1 + A_2\right)^2} + \frac{1}{\left(A_3 + A_4\right)^2} \quad [19]$$

O de aperturas en serie:

$$\left.\begin{aligned} A_{salida} &= A_1 + A_3 \\ A_{entrada} &= A_2 + A_4 \end{aligned}\right\} \quad \frac{1}{A_{ef}^2} = \frac{1}{\left(A_1 + A_3\right)^2} + \frac{1}{\left(A_2 + A_4\right)^2} \quad [20]$$

Donde las áreas se indican en la figura 15.

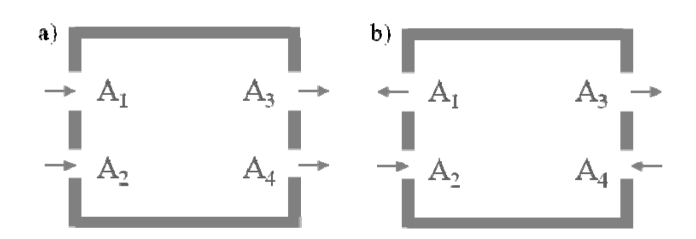


Fig.15. Disposición de aperturas en paralelo (a) y en serie (b).

3.3.1. *Ejercicio práctico 7.Ventilación debida a diferencia de densidades*

Enunciado: una vivienda de 6 m de altura mantiene unas condiciones interiores de 22ºC cuando las exteriores son de 10ºC. La vivienda tiene dos ventanas a 1,5 m y a 4,5 m del suelo con un área cada una de 0,5 m^2 y un coeficiente de descarga de 0,6. En ausencia de viento determinar el flujo de aire debido a diferencia de densidades, en m^3/s así como las renovaciones de aire a la hora si el volumen del local es de 10 m de largo; 10 m de ancho y 6 m de alto.

Solución: considerando los datos de diferencia de altura entre aperturas, 3 m, temperaturas interior y exterior, 22ºC y 10ºC y para una densidad ρ_o de 1,2 kg/m^3, a una temperatura de referencia de 20ºC se aplica la ecuación 18 obteniéndose una diferencia de presión de -1,49 Pa.

A continuación se determina el área efectiva de las dos aperturas en serie con la ecuación 20, obteniéndose un área efectiva de 0,35 m^2. Sustituyendo estos valores y los datos conocidos en la ecuación 8 se obtiene un caudal de aire de 1,33 m^3/s o 1202 m^3/h.

Dado que el volumen del local es de 600 m^3, las renovaciones de aire a la hora se determinan dividiendo el caudal en m^3/h entre el volumen del local. Con lo que se obtiene un resultado de 2 h^{-1} renovaciones de aire a la hora.

3.4. Casos prácticos de ventilación natural debida a diferencia de densidades

A continuación se describen algunos casos de ventilación natural debido a diferencia de densidades.

Caso práctico I: Edificio multizona sin permeabilidad entre zonas verticales. Muchos edificios mantienen una independencia entre zonas en sentido vertical como muestra la figura 16. En estos edificios, puede existir una ventilación natural local en cada zona si se dispone de las aperturas necesarias.

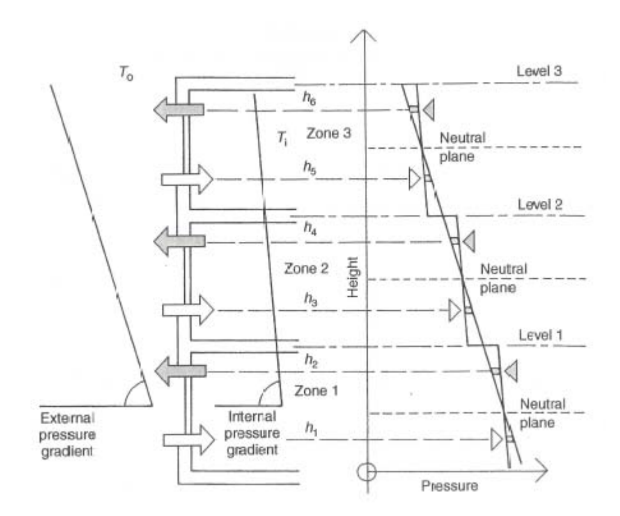


Fig.16. Presión debida a diferencia de densidades con zonas verticales sin conectar [2].

Cada zona tiene su plano de presión neutra y las zonas son independientes entre sí. La diferencia de presión puede calcularse aplicando la ecuación 18 a cada zona de forma separada, sustituyendo la diferencia de altura entre dos aperturas de la misma zona. El caudal de ventilación se

determina mediante la ecuación 8 sustituyendo el área efectiva para el caso de dos aperturas en serie, ecuación 20.

Caso práctico II: Edificio multizona con permeabilidad entre zonas verticales. Se consideran en este caso los edificios que tienen una apertura en la zona baja, zona 1, otra apertura en la zona alta, zona 2, y un hueco interior entre la zona baja y la zona alta, ver figura 17.

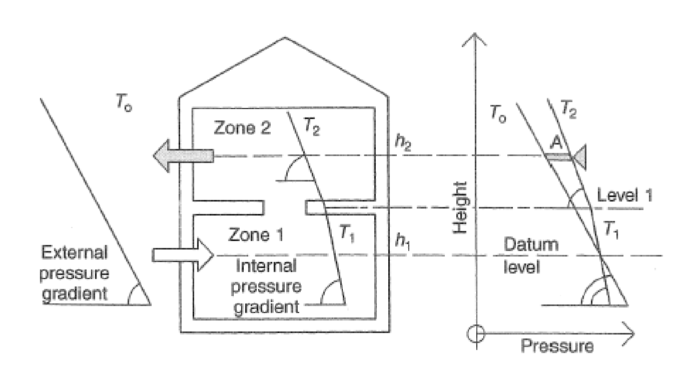


Fig.17. Presión debida a diferencia de densidades con zonas verticales conectadas [2].

Las temperaturas de las zonas 1 y 2 son diferentes, típicamente $T_{i2}>T_{i1}$, y esto produce diferentes gradientes de presión para cada zona, como recoge la figura 17. La presión debida a diferencia de densidades entre dos aperturas externas situadas a alturas h_1 y h_2 puede calcularse empleando la expresión:

$$\Delta P_s = -\rho_o g T_o \left[(z_1 - h_1)\left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_{i1}}\right) + (h_2 - z_1)\left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_{i2}}\right) \right] \quad [21]$$

Donde las temperaturas deben sustituirse en K, para obtener la diferencia de presión en Pa.

3.4.1. *Ejercicio práctico 8. Ventilación debida a diferencia de densidades en edificio multizona con permeabilidad entre zonas verticales*

Enunciado: una vivienda de 6 m mantiene unas condiciones interiores de 22ºC en la planta baja y de 28ºC en la planta alta cuando las exteriores son de 10ºC. La vivienda tiene dos ventanas a 1,5 m de la planta baja y a 1,5 m del suelo de la planta alta, con un área cada una de 0,5 m^2 y un coeficiente de descarga de 0,6. La primera planta está a 3 m de altura y el hueco horizontal entre plantas es de 0,5 m^2. Considerando solo la ventilación por diferencia de densidades, determinar el flujo de aire debido a diferencia de densidades, en m^3/s así como las renovaciones de aire a la hora si el volumen del local es de 10 m de largo; 10 m de ancho y 6 m de alto.

Solución: se tienen los datos de temperatura interior, T_{i1} y T_{i2}, 22ºC y 28ºC, así como de temperatura exterior, T_e, 10ºC. Las cotas de h_1, 1,5 m, h_2, 4,5 m y z, 3 m. Considerando una densidad ρ_o de 1,2 kg/m^3, a una temperatura de referencia de 20ºC y sustituyendo los datos en la ecuación 21 se tiene una diferencia de presión por diferencia de densidades de -1,84 Pa.

Se determina el área efectiva de las tres aperturas en serie con la ecuación 20, obteniéndose un área efectiva de 0,29 m^2. Sustituyendo estos valores y los datos conocidos en la ecuación 8 se obtiene un caudal de aire de 0,33 m^3/s o 1091 m^3/h.

Dado que el volumen del local es de 600 m^3, las renovaciones de aire a la hora se determinan dividiendo el caudal en m^3/h entre el volumen del local. Con lo que se obtiene un resultado de 1,8 h^{-1} renovaciones de aire a la hora.

Caso práctico III: Edificio multizona con permeabilidad entre zonas verticales. Esta situación se encuentra frecuentemente en edificios de varias plantas en los que el tronco de escaleras conecta todas las plantas y existe una diferencia de temperaturas entre la escalera y el resto de zonas, como muestra la figura 18.

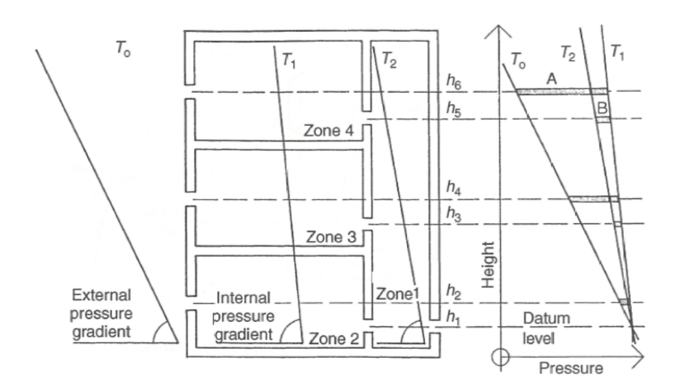


Fig.18. Presión debida a diferencia de densidades en edificios con zonas conectadas horizontales [2].

Si existe diferencia de temperaturas entre las zonas horizontales de un edificio, y están conectadas por huecos, el análisis de ventilación natural es el mismo que en el caso anterior. La diferencia de presión se calcula en cada altura en relación a la apertura más baja y el área efectiva de dos o más aperturas se determina de igual forma que en los casos anteriores.

Para simplificar el análisis puede asumirse que cada zona tiene una temperatura media uniforme. La diferencia de presión debida a diferencia de densidades entre la zona 1 y la zona 4 viene dada por:

$$\Delta P_s = -\rho_o g T_o (h_5 - h_1)\left(\frac{1}{T_{i2}} - \frac{1}{T_{i1}}\right) \quad [22]$$

Donde T_{i1} y T_{i2}, son las temperaturas interiores en las zonas 1, tronco de escaleras y zona 4, resto de zonas a temperatura uniforme; h_1 y h_5 son las alturas de las aperturas de las zonas 1 y 4, en m, respectivamente. Una vez determinada la diferencia de presiones, el caudal de aire se determina de la misma forma que en el caso anterior.

Caso práctico IV: Edificio unizona con estratificación de aire vertical. En espacios interiores de gran altura, como atrios o naves industriales, se produce una significativa estratificación del aire en su interior. Por tanto, se establece un gradiente interno de presión, que afecta a la diferencia de presión debido a diferencia de densidades entre las aperturas situadas en la parte baja y las aperturas de la cubierta, ver figura 19.

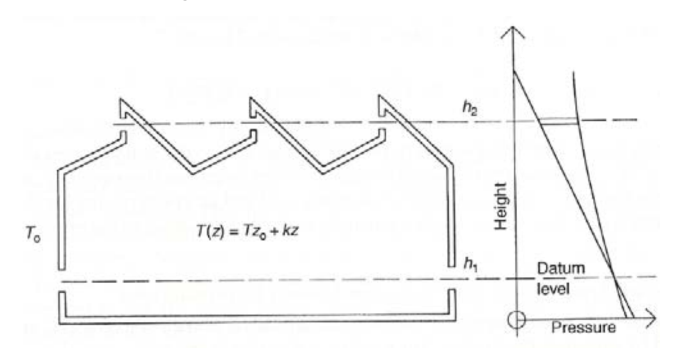


Fig.19. Presión debida a diferencia de densidades en edificios con gradiente de temperatura interior [2].

Se asume un gradiente lineal de temperaturas dependiente de la altura, z, según la relación:

$$T(z) = T_{zo} + k\,z \qquad [23]$$

Donde T_{zo} es la temperatura del aire a la altura z_o, en K; y k es el gradiente de temperaturas en Km^{-1}. En este caso la diferencia de presión debida a diferencia de densidades se determina mediante la expresión:

$$\Delta P_s = -\rho_o\, g\, T_o \left[\frac{1}{k}\ln\left(T_{zo} + kz\right)\right]_{z=0}^{z=h} \qquad [24]$$

Obsérvese que para $k = 0$, temperatura de local uniforme, la ecuación 24 se convierte en la ecuación:

$$\Delta P_s = -\rho_o\, g\, T_o \left[z\right]_{z=0}^{z=h} \qquad [25]$$

El caudal de aire de ventilación se determina a partir de esta diferencia de densidades igual que en los casos anteriores.

3.4.2. Ejercicio práctico 9. Ventilación debida a diferencia de densidades en edificio con estratificación de temperaturas

Enunciado: una nave industrial tiene una apertura de 0,5 m^2 a 1 m de altura y otra a 6 m. Debido al gradiente de temperaturas, se ha medido una temperatura de 15ºC a 1 m y de 40ºC a 6 m. Considerando solo la ventilación por diferencia de densidades, determinar el flujo de aire, en m^3/s, así como las renovaciones de aire a la hora si las dimensiones del local corresponden a 60 m de largo; 20 m de ancho y 6 m de alto.

Solución: se tienen los datos de temperaturas interiores, T_{i1} y T_{i2}, 15ºC y 40ºC, así como de temperatura a la altura de referencia, T_{zo}, 15ºC. Las cotas de las aperturas z_h, 6 m, z_0, 1 m. Considerando la ecuación 23 se determina en primer lugar el gradiente en función de la altura, z:

$$k = \frac{T_{i2} - T_{i1}}{z_h - z_o} = \frac{(273{,}15+40)-(273{,}15+15)}{(6-1)} = 5\,K/m$$

Sustituyendo datos conocidos en la ecuación 24:

$$\Delta P_s = -\rho_o\, g\, T_o \left[\frac{1}{k}\ln\left(T_{zo} + kz\right)\right]_{z=1}^{z=6} = -\frac{\rho_o\, g\, T_o}{k}\ln\left(\frac{T_{zo}+kz_h}{T_{zo}+kz_o}\right) =$$

$$-\frac{1{,}2\,9{,}81(273{,}15+15)}{5}\ln\left(\frac{(273{,}15+15)+5\,6}{(273{,}15+15)+5\,1}\right) = -56{,}68\,Pa$$

Se obtiene una diferencia de presión debida a diferencia de densidades de -56,68 Pa.

El área efectiva, se determina con la ecuación 20 al tratarse de dos aperturas en serie. Sustituyendo en la ecuación 8 se obtiene un caudal de aire de 2 m^3/s ó 7346 m^3/h. Teniendo en cuenta que la nave tiene un volumen de 7200 m^3, se obtienen unas renovaciones de aire a la hora de 1,02h^{-1}.

Obsérvese que la existencia de gradientes de temperatura internos en el interior aumenta significativamente la diferencia de presión y por tanto el caudal de ventilación natural. En general, se obtiene tanto más caudal cuanto mayor es la altura y mayor es el gradiente de temperaturas.

4. Ventilación natural combinada. Modelos de cálculo

La presión total que actúa sobre una apertura de un edificio, o sobre todo el edificio, es la suma de la presión debida al viento, la presión debida a diferencia de densidades y la presión debida a ventiladores. La presión

total se obtiene como contribución de las distintas diferencia de presiones que actúan en un edificio: la debida al viento, la debida a la diferencia de densidades y la debida a los medios mecánicos como ventiladores. La figura 20 ilustra este concepto. Aunque los valores absolutos de cada componente varían según el edificio y la zona climática, se tienen valores típicos de presión debida al viento entre 1 y 35 Pa; valores típicos de presión debida a diferencia de densidades entre 0,3 y 3 Pa; y valores típicos de presión debida a ventiladores típicamente superiores a 100 Pa.

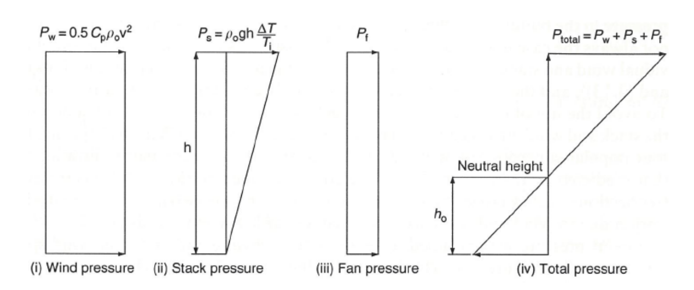


Fig.20. Componentes de la presión total: presión debida al viento; presión debida a diferencia de densidades; presión debida a ventiladores [2].

El flujo de aire total que actúa sobre una apertura de un edificio, o sobre todo el edificio, es función de $(\Delta P)^n$. Tomando como referencia las presiones de la figura 20 se obtendrían los caudales que se muestran en la figura 21.

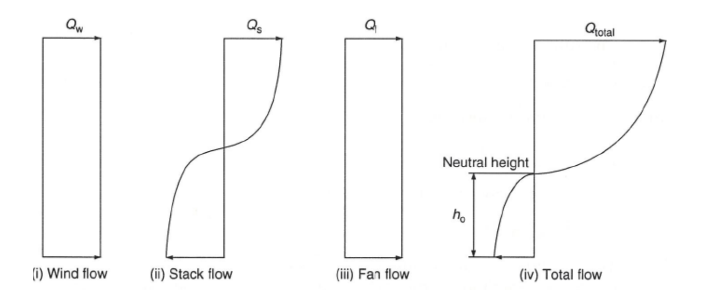


Fig.21. Componentes del caudal total de aire: caudal debido al viento; caudal debido a diferencia de densidades; caudal debido a ventiladores [2].

4.1. Estimación de caudal de aire en ventilación natural combinada

Sin embargo, la presión interna de un edificio no está afectada de la misma forma por el efecto de viento y diferencia de densidades. Por tanto, no es una combinación lineal de ambas. El caudal total se determina mediante el método de superposición [20]:

$$Q_t = \left(Q_w^2 + Q_s^2\right)^{0,5} \qquad [26]$$

Donde Q_t es el caudal total de aire; Q_w es el caudal de aire debido al viento; Q_s es el caudal de aire debido a diferencia de densidades.

4.1.1. Ejercicio práctico 10. Ventilación natural combinada

Enunciado: En una vivienda de planta cuadrada situada en campo abierto el viento incide con ángulo de 0º. Hay una apertura de 1 m^2 en la fachada de barlovento y otra en la fachada de sotavento. Entre ambas aperturas se ha estimado una presión debida a diferencia de densidades de 4,3 Pa. Determinar: a) la velocidad de aire que produciría una presión debida al tiempo de la misma magnitud, en km/h; b) el caudal de aire debido a diferencia de densidades y al viento, en l/s; y c) el caudal total, en l/s.

Solución: se tienen los datos vivienda planta cuadrada en campo abierto. Con ello se determinan los valores de los coeficientes de presión, c_{p1} y c_{p2}, de 0,7 y -0,2 respectivamente. Sustituyendo los valores del coeficiente de presión y de la diferencia de presión de 4,3 Pa en la ecuación 12 se obtiene la velocidad del aire necesaria para producir esa diferencia de presión. El resultado es de 2,8 m/s.

Dado que se trata de dos aperturas en serie de 0,5 m^2 cada una, el área efectiva se determina con la ecuación 20, obteniéndose un valor de 0,42 m^2.

Considerando una diferencia de presión de 4,3 Pa, y considerando el área efectiva calculada, se obtiene un caudal de aire de 1,14 m^3/s ó 1135,8 l/s. Este valor es igual para la componente debida al viento, Q_w, como para la componentes debida a la diferencia de densidades, Q_s, dado que la diferencia de presión considerada es idéntica en ambos casos.

La presión total se obtiene aplicando la ecuación 26, obteniéndose un valor de 1,6 m^3/s o 1606,2 l/s.

4.2. Modelos de cálculo. Modelos empíricos

El análisis de problemas relacionados con la ventilación natural puede resolverse mediante tres tipos de modelos: modelos empíricos, modelos nodales y modelos CFD [21].

Los modelos empíricos consideran hipótesis simplificadoras para el estudio de problemas reales de ventilación natural. Estos modelos proponen expresiones sencillas que resultan útiles para hacer aproximaciones en algunos tipos de problemas concretos.

Los modelos empíricos se basan en datos empíricos obtenidos en edificios unizona, de tipo residencial, comercial o de pequeña industria.

4.2.1. Modelo empírico de ASHRAE

El modelo empírico propuesto por ASHRAE está basado en el modelo LBNL [22]. Este modelo se basa en el área efectiva de una apertura. Este valor se determina mediante test presurización, tablas o medidas empíricas. El modelo es aplicable a casos de ventilación debido a infiltraciones, es decir, no es aplicable a aperturas grandes.

En el modelo ASHRAE el caudal de aire debido a infiltraciones en un edificio unizona viene dado por:

$$Q = A\sqrt{a\,\Delta T + b\,V^2} \qquad [27]$$

Donde Q es el caudal, en m^3/h; A es el área total efectiva, en cm^2; a es el coeficiente debido a diferencia densidades, en $m^6/h^2\ cm^4\ K$; b es el coeficiente debido al viento, en $m^4\ s^2/h^2\ cm^4$; ΔT es la diferencia de temperaturas interior-exterior, en K; y V es la velocidad media del viento medida en la estación meteorológica local, en m/s.

Tabla 4a
Coeficiente "a" debido a diferencia densidades, en $m^6/h^2\ cm^4\ K$
Extraído de [7]

	Número de plantas de la vivienda		
	1	2	3
	0,00188	0,00376	0,00564

Tabla 4b
Coeficiente "b" debido al viento, en $m^4\ s^2/h^2\ cm^4$
Extraído de [7]

	Número plantas de la vivienda		
	1	2	3
Edificio expuesto	0,00143	0,00544	0,00640
Campo con algunos obstáculos	0,00319	0,00421	0,00495
Barrio residencial	0,00226	0,00299	0,00351
Área suburbana	0,00135	0,00178	0,00209
Centro de la ciudad	0,00041	0,00054	0,00063

4.2.1.1. *Ejercicio práctico 10. Ventilación natural combinada por el método Ashrae*

Enunciado: estimar las renovaciones de aire a la hora durante el invierno para una vivienda de dos alturas con un volumen de 300 m^3 y un área total de infiltraciones de 800 cm^2 asumiendo una velocidad media del viento de 5 m/s y una diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de 22 K. La vivienda está situada en un área urbana de una gran ciudad.

Solución: se tienen los datos de la vivienda correspondientes al área A, la velocidad de viento, V y la diferencia de temperatura, ΔT. Como se trata de un vivienda de dos alturas, el coeficiente a vale 0,00376 $m^6/h^2\ cm^4$ K; como la vivienda está en área urbana el coeficiente b vale 0,00054 $m^4\ s^2/h^2\ cm^4$. Sustituyendo estos datos en la ecuación 27 se obtiene un caudal de aire combinado de 248,2 m^3/h. Para un volumen de 300 m^3, se obtienen unas renovaciones de aire a la hora de 0,83 h^{-1}.

4.2.2. *Modelo empírico del British Standard*

Uno de los modelos empíricos más usados es el propuesto por BS [6]. Este modelo se emplea para determinar la ventilación debida tanto a infiltraciones como a aperturas de ventilación. Se basa en la hipótesis de flujo bidimensional y edificios sin particiones internas. Considera básicamente tres casos: ventilación debida sólo a viento, ventilación debida sólo a diferencia de densidades así como la ventilación combinada. En cada caso considera problemas tanto de ventilación cruzada como de ventilación por una cara.

4.2.2.1. *Modelo empírico del British Standard. Caso I ventilación cruzada*

Tres casos típicos de ventilación cruzada se recogen en la tabla 5. En cada caso se consideran las expresiones para el cálculo del caudal de ventilación, en m^3/s.

Tabla 5
Casos de ventilación cruzada, según BS [6].

Ecuación propuesta

Caso a. Ventilación debida solo al viento

$$Q_w = C_d\,A_w\,V\left(\Delta C_p\right)^{0,5}$$

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{\left(A_1 + A_2\right)^2} + \frac{1}{\left(A_3 + A_4\right)^2}$$

Caso b. Ventilación debida solo a la diferencia de densidades

$$Q_s = C_d\,A_s\left(\frac{2\,\Delta T\,g\,h}{\overline{T}}\right)^{0,5}$$

$$\overline{T} = \frac{T_e + T_i}{2}$$

$$\frac{1}{A_s^2} = \frac{1}{\left(A_2 + A_4\right)^2} + \frac{1}{\left(A_1 + A_3\right)^2}$$

Caso c. Ventilación combinada (viento y diferencia densidades

$$Q = Q_s \quad si$$

$$\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26\left(\frac{A_s}{A_w}\right)^{0,5}\left(\frac{h}{\Delta C_p}\right)^{0,5}$$

$$Q = Q_w \quad si$$

$$\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26\left(\frac{A_s}{A_w}\right)^{0,5}\left(\frac{h}{\Delta C_p}\right)^{0,5}$$

$$\Delta T = T_i - T_e$$

4.2.2.2. Ejercicio práctico 12. Ventilación natural combinada por el método BS

Enunciado: estimar las renovaciones de aire a la hora por el método BS para una vivienda de dos alturas de 8 m de altura de planta cuadrada en entorno urbano con un volumen interior de 500 m^3. La vivienda tiene 2 ventanas en la cara oeste y dos ventanas en la cara este. Las ventanas están separadas una distancia vertical de 5 m en cada fachada. La velocidad media del viento medida en la estación meteorológica es de 30 km/h y su dirección es oeste-este. El área de cada ventana es de 0,5 m^2. La temperatura interior es de 25ºC y la exterior es de 15ºC. Considerar un coeficiente de descarga de 0,8.

Solución: se tienen los datos de la vivienda de planta cuadrada en entorno urbano y de la velocidad de viento medida. Llevando estos datos a la ecuación 5 se obtiene una velocidad del viento a la altura de 5 m de 3,5 m/s.

Dado que se trata de 2 ventanas en cada fachada con área de 0,5 m^2, se determinan las áreas efectivas con las ecuaciones de la tabla 5. Para caso de viento, el área efectiva A_w es de 0,7071 m^2. Para caso de diferencia de densidades el área efectiva A_s es de 0,7071 m^2.

Dado que se trata de un problema de ventilación combinada, se aplican las ecuaciones de la tabla 5 caso c:

$$x = \frac{V}{\sqrt{\Delta T}} = \frac{5}{\sqrt{25-15}} = 1,10$$

$$y = 0,26\left(\frac{A_b}{A_w}\right)^{0,5}\left(\frac{h}{\Delta C_p}\right)^{0,5} = \qquad [28]$$

$$= 0,26\left(\frac{0,7071}{0,7071}\right)^{0,5}\left(\frac{8}{-0,25-0,2}\right)^{0,5} = 0,87$$

Como $y > x$ el caudal combinado es el correspondiente al calculado para el caso de ventilación por viento: caso c:

$$Q_w = C_d\, A_w\, V\left(\Delta C_p\right)^{0,5} = \qquad [29]$$

$$= 0,8\ 0,7071\ 5\ \left(\left|-0,25-0,2\right|\right)^{0,5} = 1,32\, m^3/s$$

Es decir, 4748 m^3/h. Para un volumen de 500m^3 se obtienen 9,5 h^{-1} renovaciones de aire a la hora.

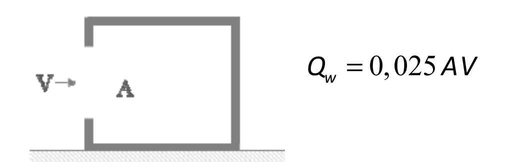
4.2.2.3. Modelo empírico del British Standard. Caso II ventilación por una cara

Tres casos de ventilación por una sola cara se recogen en la tabla 6. En cada caso se consideran las expresiones para el cálculo del caudal de ventilación, en m^3/s.

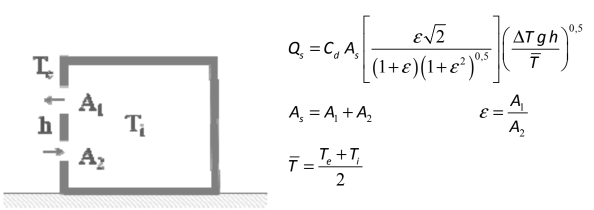
Tabla 6
Casos de ventilación por una sola cara, según BS [6]

Ecuación propuesta

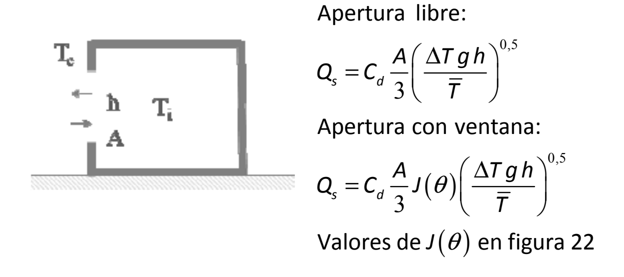
Caso d. Ventilación debida solo al viento



Caso e. Ventilación debida a diferencia densidades dos aperturas



Caso f. Ventilación debida a diferencia densidades una apertura



4.2.2.4. Ejercicio práctico 13. Ventilación natural combinada por el método BS

Enunciado: una habitación con un volumen de 100 m^3 tiene una ventana con una hoja de apertura lateral con un hueco libre de 0,53 m de ancho por 1,2 m de alto. La temperatura interior es de 25ºC y la exterior es de 15ºC. Considerar un coeficiente de descarga de 0,8. Estimar las renovaciones de aire a la hora por el método BS en los siguientes casos:

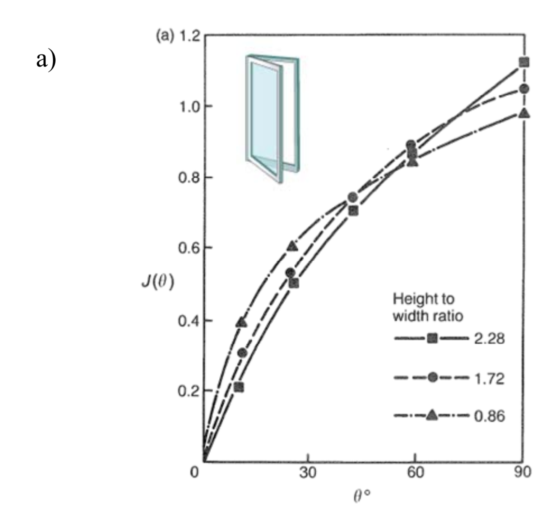
a) ventana abierta 90º;
b) ventana abierta 45º;
c) ventana abierta 10º.

Solución: los datos corresponden al caso f de la tabla 6, en el caso de apertura con ventana. La relación alto, 1,2m, a ancho, 0,53 m, de la ventana es de 2,26.

Los valores del coeficiente $J(\theta)$ se obtienen de la figura 22 a). Los valores de $J(\theta)$ en cada apartado son a) 1,1; b) 0,7; y c) 0,2. Sustituyendo estos datos en la ecuación propuesta tabla 6 caso f:

$$Q_s = C_d \frac{A}{3} J(\theta)\left(\frac{\Delta T\, g\, h}{\overline{T}}\right)^{0,5} = \qquad [30]$$
$$= 0,8\,\frac{(0,531,2)}{3} J(\theta)\left(\frac{109,811,2}{20}\right)^{0,5}$$

a)



b)

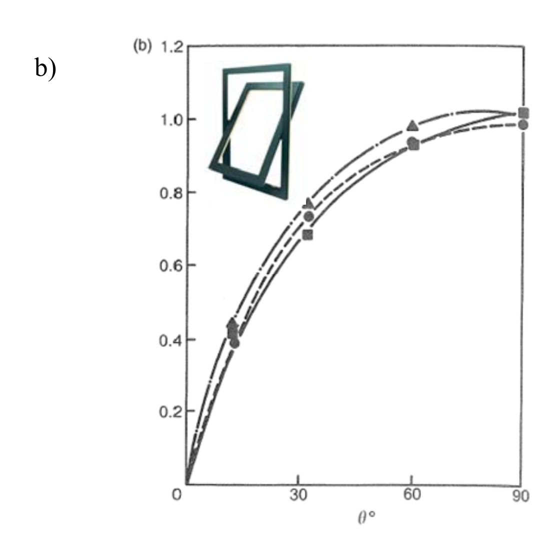


Fig.22. Efecto del ángulo de apertura θ de una ventana sobre $J(\theta)$

a) Ventana de hoja practicable de apertura lateral; b) Ventana de hoja pivotante [6].

Se obtiene un caudal de a) 0,118 m^3/s; b) 0,075 m^3/s y c) 0,022 m^3/s. Cambiando unidades: a) 425,7 m^3/h; b) 270,9 m^3/h y c) 77,4 m^3/h.

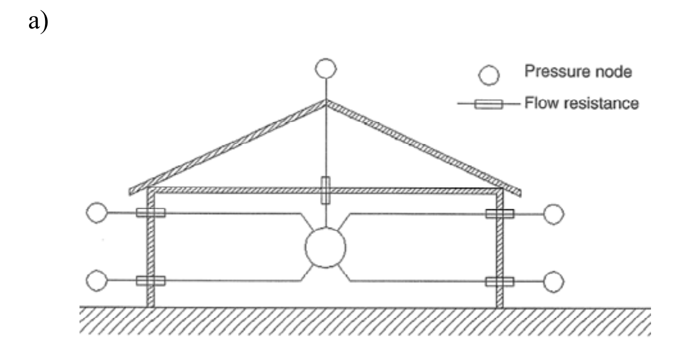
Considerando el volumen del local, 100 m^3, y los caudales se obtienen las renovaciones de aire a la hora: a) 4,3 h^{-1}; b) 2,7 h^{-1} c) 0,8 h^{-1}.

4.3. Modelos de cálculo. Modelos nodales

A diferencia de los modelos empíricos, los modelos de ventilación nodales se basan en la teoría en vez de en los datos empíricos. Estos modelos son aplicables a edificios unizona o multizona. La figura 23 ilustra esquemáticamente el caso de edificios unizona y multizona.

Los modelos que se describen a continuación se corresponden con el modelado de edificio unizona o multizona.

a)



b)

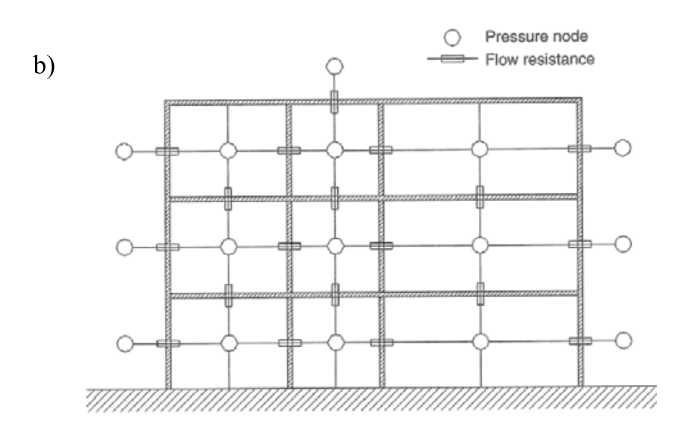


Fig.23. Esquema de modelado de ventilación natural de un edificio a) unizona; y b) multizona. [6].

4.3.1. Modelos nodales unizona

Un edificio unizona es aquel en el que no hay o no se consideran particiones internas. Por tanto, las condiciones internas se pueden considerar homogéneas. Aunque estos edificios no son frecuentes en la práctica, se pueden considerar edificios unizona aquellos en los que el efecto de las particiones internas tiene poca influencia sobre el movimiento de aire en el edificio, como es el caso de pequeñas viviendas o grandes recintos interiores.

Los modelos unizona más conocidos han sido desarrollados por el Building Research Establishment, BRE, [23], el Lawerence Berkeley Laboratory, LBL, [22] [24], y el modelo AIDA, [25] desarrollado por el Air Infiltration and Ventilation Centre, AIVC [9]. Los modelos unizona consideran la temperatura del aire de la zona uniforme. De esta forma, la zona considerada queda caracterizada por un valor de presión y temperatura, y estas variables se asignan a un nodo. Para analizar los flujos de aire entre la zona y el exterior se consideran nodos internos, nodos externos así como resistencias flujo.

4.3.2. Modelos nodales multizona

Cuando el edificio tiene un número de zonas bien definidas, como edificios de varias plantas, se requiere trabajar con el modelo de edificio multizona. En un edificio multizona, el flujo de aire a través de la envuelta está afectado por la resistencia al flujo de las diferentes zonas internas. En este caso, la predicción de los flujos de aire requiere un análisis de modelo en red denominado modelo nodal multizona.

En un modelo nodal multizona, los nodos representan locales o zonas del edificio. La conexión entre dos nodos representa una trayectoria del flujo con una resistencia determinada. Las resistencias al flujo son puertas o ventanas, abiertas o cerradas, huecos y rendijas en la envuelta del edificio, así como componentes de ventilación mecánica y conductos.

Cada nodo en la red tiene un valor de presión, que normalmente es dato en los nodos externos al edificio, pero debe determinarse para los nodos internos. En los modelos multizona los nodos pueden estar conectados en serie o en paralelo, ver figura 23b. El flujo entre dos nodos puede estimarse aplicando la ecuación:

$$Q_i = k_i \left(\Delta P\right)_i^n \qquad [31]$$

Donde k y n son coeficientes conocidos para cada trayectoria de flujo y k es el coeficiente de flujo en m^3/(s Pa); i se refiere a cada una de las i-trayectorias del flujo; Q es el caudal de aire entre dos nodos, en m^3/s; ΔP es el gradiente de presión, en Pa.

A partir de la ecuación 31 es posible determinar el flujo de aire entre dos nodos en serie, como muestra la figura 24a.

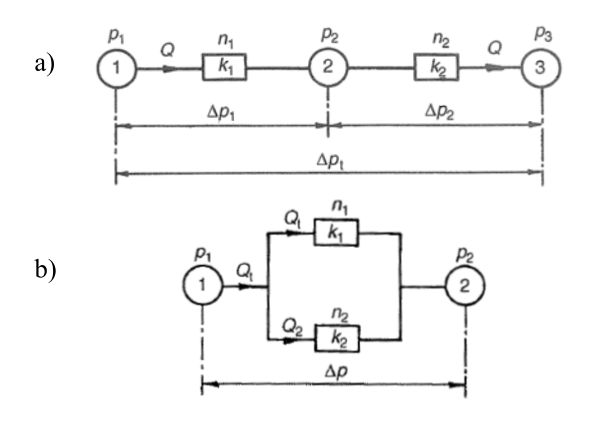


Fig.24. Trayectorias de aire. a) nodos en serie; y b) nodos en paralelo. [2].

Para nodos en serie, la diferencia de presión es la suma de la diferencia de presión de cada nodo; el caudal de aire de un nodo al siguiente es el mismo:

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= \Delta P_1 + \Delta P_2 \\ Q &= k_1 \left(\Delta P_1\right)^{n_1} = k_2 \left(\Delta P_2\right)^{n_2} \end{aligned} \qquad [32]$$

Y sustituyendo ésta última en la anterior:

$$\Delta P_t = \left(Q / k_1\right)^{1/n_1} + \left(Q / k_2\right)^{1/n_2} \qquad [33]$$

En un problema concreto, teniendo como dato los coeficientes k_i y n_i se determinan los valores de ΔP y de Q resolviendo iterativamente las ecuaciones [32, 33].

Para nodos en paralelo, figura 24b, el caudal es la suma de los caudales que circulan por cada nodo y la diferencia de presión es la misma entre 1 y 2:

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_1 + Q_2 \\ Q_1 &= k_1 \left(\Delta P_1\right)^{n_1} \\ Q_2 &= k_2 \left(\Delta P_2\right)^{n_2} \end{aligned} \qquad [34]$$

Sustituyendo estas dos últimas en la primera se obtiene:

$$Q_t = k_1 \left(\Delta P_1\right)^{n_1} + k_2 \left(\Delta P_2\right)^{n_2} \qquad [35]$$

En un problema concreto, teniendo como dato los coeficientes k_i y n_i se determinan los valores de ΔP y de Q resolviendo iterativamente las ecuaciones [34, 35].

En el modelo multizona, cada zona del edificio queda definida por una red de flujo entre nodos, como se representa esquemáticamente en la figura 25.

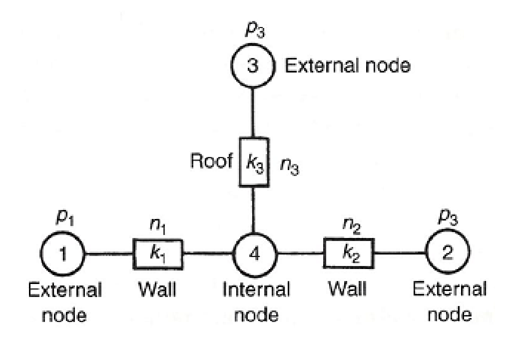


Fig.25. Esquema de red de nodos en una zona [2].

Aplicando el balance de masa a cada una de las j trayectorias:

$$\sum_{i=1}^{j} \rho_i Q_i = 0 \qquad [36]$$

Donde Q es el caudal de aire en la trayectoria i, en m^3/s; ρ es la densidad del aire a través de la trayectoria i, en kg/m^3.

Sustituyendo la ecuación 31 en la ecuación 36:

$$\sum_{i=1}^{j} \rho_i k_i \left(P_i - P\right)^{n_i} = 0 \qquad [37]$$

Donde P es la presión interna de la zona. Para evitar valores negativos en la base del exponente cuando $P_i < P$, la ecuación [37] se expresa como:

$$\sum_{i=1}^{j} \rho_i k_i \underbrace{\left|P_i - P\right|^{n_i}}_{I} \underbrace{\left[\frac{P_i - P}{\left|P_i - P\right|}\right]}_{II} = 0 \qquad [38]$$

Donde el término I expresa el valor absoluto de la ΔP externa-interna y el término II: restaura el signo que se pierde en el término I. Por tanto, cuando $P_i > P$ el término II vale 1, y cuando $P_i < P$ el término II vale -1. En este tipo de problemas se considera que existen infiltraciones a la zona cuando se obtiene signo positivo y exfiltraciones de aire con signo negativo.

Resolviendo de forma iterativa la ecuación [38] se determina la presión interna de la zona, P. A partir de este valor, se calcula el caudal de aire de cada trayectoria mediante la ecuación [31]. El caudal total de aire en cada zona es la suma de los caudales calculados para cada trayectoria:

$$Q_t = \sum_{i=1}^{j} Q_i \qquad [39]$$

En el modelado de un edificio multizona con un número q de zonas hay igual número de presiones internas, P. El modelo genera igual número de ecuaciones que deben resolverse simultáneamente para determinar los caudales de aire entre las diferentes zonas. En los últimos años, distintos autores han desarrollado algoritmos para resolver los flujos de aire en edificios multizona. Algunos de los más conocidos son el modelo AIDA, [25] desarrollado por el Air Infiltration and Ventilation Centre, AIVC [9], el modelo CONTAM [26] desarrolado por el NIST, y el modelo COMIS [27, 28 y 29] desarrollado por el LBNL y en el marco de la Agencia Internacional de la Energía, IEA Anexo 23. Este último es empleado en el entorno de simulación energética de edificios integrándolo en TRNSYS [30] con el nombre de TRNFLOW [31].

4.4. Modelos de cálculo. Modelos CFD

Durante las últimas décadas ha habido un creciente interés para aplicar los programas de Dinámica de Fluidos Computacional, CFD, a los problemas de ventilación natural en edificios [32]. Los modelos de cálculo basados en CFD resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes, ecuaciones de conservación de masa, energía, momento, concentración así como la ecuación de transporte de velocidad turbulenta. Los fundamentos de las técnicas de CFD, los modelos de turbulencia, el tratamiento de pared y condiciones de contorno se describen en profundidad en [33, 34]. La solución numérica de estas ecuaciones en dos y tres dimensiones ha sido aplicada a un amplio conjunto de flujos de aire en sistemas de ventilación natural.

Los modelos nodales pueden predecir adecuadamente flujos de aire en problemas de ventilación natural y simular el potencial de ventilación en periodos de tiempo amplios de hasta un año. Sin embargo, los modelos nodales no predicen con detalle los flujos de aire en el interior del edificio.

Los modelos de ventilación basados en técnicas de CFD permiten obtener un elevado nivel de detalle en el campo de velocidades, presiones, temperaturas y concentraciones tanto en el exterior como en el interior del edificio. Sin embargo, la complejidad de los modelos CFD no permite trabajar con un gran número de zonas. Las simulaciones con modelos CFD corresponden normalmente a instantes de tiempo puntuales.

No obstante, los modelos CFD tienen ventajas significativas [35, 36] respecto a otros modelos de ventilación dado que se obtienen datos detallados de las variables de flujo en el dominio estudiado, así como un control exhaustivo sobre las condiciones de contorno. Por estas razones, muchos estudios de evaluación y optimización del potencial de ventilación natural en edificios emplean la metodología CFD [37].

Los modelos de CFD permiten resolver con detalle las interacciones entre el flujo de aire en el exterior del edificio y el flujo de aire en el interior a través de las aperturas existentes. El enfoque del problema debe realizarse empleando una aproximación acoplada o desacoplada entre los flujos de aire interior y exterior [38]. La figura 26 ilustra esquemáticamente ambas aproximaciones.

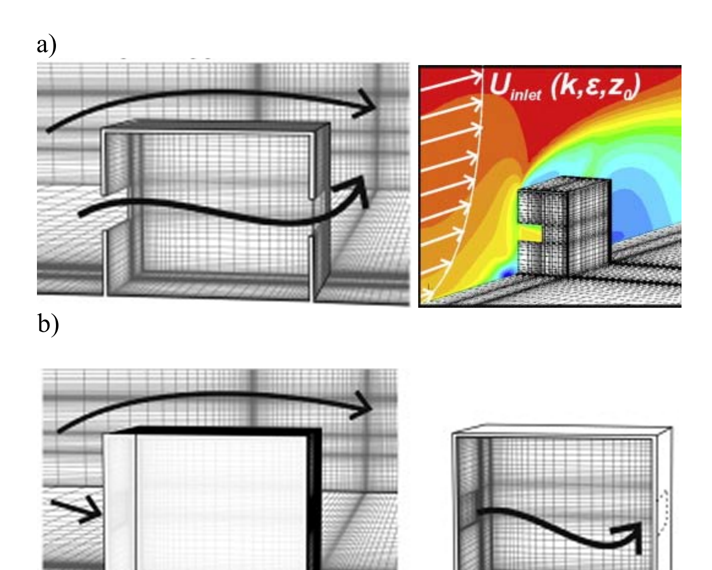


Fig.26. Modelado CFD de ventilación natural a) aproximación acoplada; b) aproximación desacoplada [38].

En la aproximación acoplada el dominio computacional incluye los detalles del interior y el exterior del edificio. En esta aproximación las aperturas del edificio se consideran abiertas y el flujo de aire exterior e interior se resuelven simultáneamente, empleando las ecuaciones gobierno adecuadas. Un gran número de trabajos han sido publicados empleando esta aproximación, véase por ejemplo [39, 40]. Puede encontrarse una extensiva revisión en [38].

Por el contrario, en la aproximación desacoplada se consideran dos dominios diferentes, uno para el flujo de aire exterior y otro para el flujo de aire interior. En esta aproximación, la simulación del flujo de aire exterior se realiza con las aperturas del edificio cerradas para obtener los coeficientes de presión en las posiciones de estas aperturas. Estos coeficientes se emplean como condiciones de contorno en el dominio del flujo de aire interior [41].

4.4.1. Ejercicio práctico 14. Ventilación natural mediante modelos CFD acoplados

Enunciado: analizar el modelado CFD de la ventilación natural cruzada en un edificio de planta cuadrada de 5,56 m de arista y 3 m de altura cuando incide un flujo de aire normal a la fachada del edificio con una velocidad de 1 m/s. El edificio tiene dos ventanas de 0,86 m de ancho y 0,15 m de alto situadas en caras opuestas del edificio y a una altura de 1,925 m sobre el suelo. Se emplea como guía de análisis el trabajo publicado por Nikas *et al.* [42].

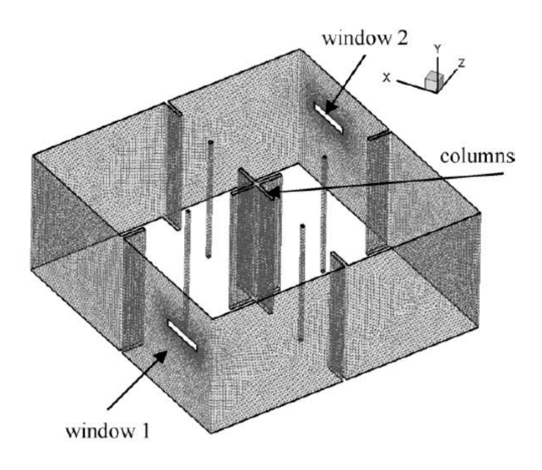


Fig.27. Edificio a estudio y detalles de ventanas [42].

Solución: tomando como referencia el trabajo de Nikas [42] se desarrolla en primer lugar la malla del dominio computacional. Dado que la estrategia a emplear es la de estrategia acoplada, el dominio incluye tanto al edificio con sus aperturas abiertas como al aire en el exterior del edificio. La malla generada consta de 3,2 10^6 elementos tetraédricos. Se muestra en la figura 28 el dominio mallado para el caso del edificio con ángulo de incidencia de viento de 45º.

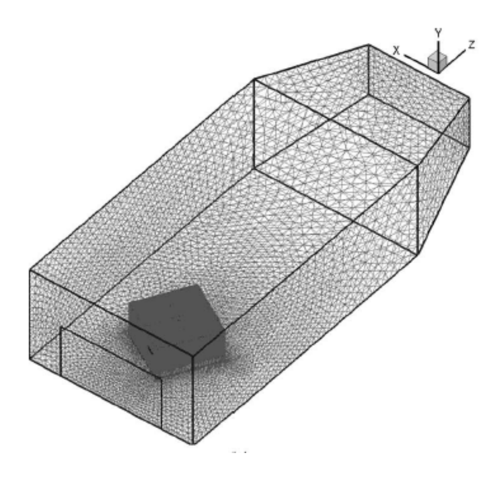
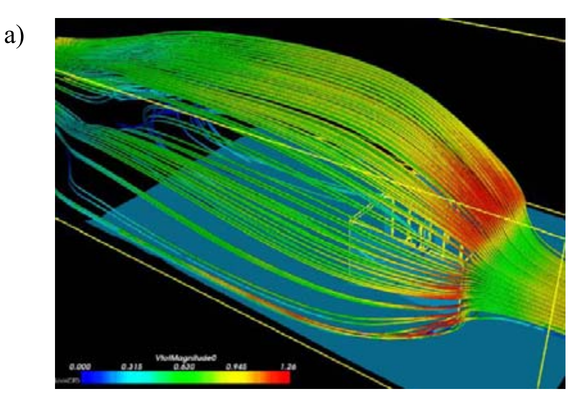


Fig.28. Dominio computacional empleando la aproximación acoplada [42].

La velocidad del aire en la entrada del dominio de 1m/s y flujo normal a la fachada del edificio se usa como condición de contorno. Se aplica la metodología CFD para resolver el modelo empleando el modelo de turbulencia k-w.

Los resultados del modelo CFD permiten obtener información detallada de las trayectorias del flujo de aire dentro y fuera del edificio. La figura 29 muestra algunos resultados para ángulos de incidencia de viento de 0º.

a)



b)

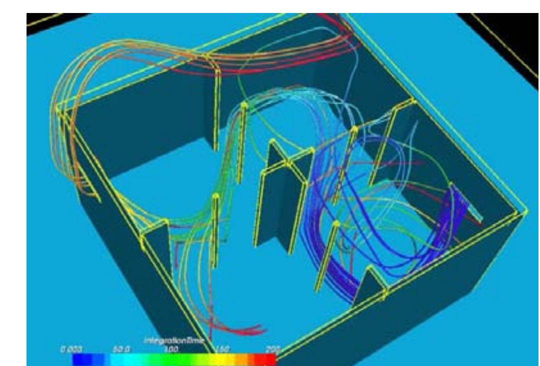


Fig.29. Trayectorias de flujo de aire a) flujo exterior al edificio; b) flujo en el interior del edificio [42].

Una vez obtenidos los valores de velocidad en cada punto del dominio estudiado es posible determinar con precisión algunas variables significativas para el estudio de la ventilación natural. Por ejemplo es posible determinar el valor de los coeficientes de presión, C_p, en la apertura de entrada, 0,7, y en la apertura de salida, 0,35. También se determina el caudal de aire de ventilación, que es de 0,068 m^3/s en las condiciones de contorno aplicadas al problema.

El modelo CFD permite analizar mediante otras simulaciones numéricas, la influencia que tiene el potencial de ventilación con otros valores de la velocidad de entrada de aire, por ejemplo de 3m/s y de 5 m/s, obteniéndose caudales de ventilación de 0,205 y 0,344 m^3/s respectivamente. También se analiza la influencia del ángulo de incidencia del viento, considerando valores de 30º, 60º y 90º. Los resultados para el caso de velocidad de 1 m/s son de 0,062 m^3/s a 30º; 0,0243 m^3/s a 60º; y 0,0144 m^3/s a 90º. Otros resultados y análisis pueden encontrarse en [42]. El modelo CFD empleado en este trabajo ha sido validado con los datos experimentales de Larsen [43].

Los resultados del modelo CFD corresponden a un determinado instante de tiempo, por lo que no resulta inmediato realizar una evaluación temporal del potencial de ventilación natural. Sin embargo, los resultados permiten obtener información detallada del potencial de ventilación, flujos de aire, valores de velocidad, coeficientes de presión, intercambio de aire entre zonas y renovaciones de aire a la hora.

La obtención de resultados consistentes con modelos de ventilación natural con CFD requiere una inversión significativa en horas de trabajo y una aplicación rigurosa y sistemática de las técnicas de CFD [44, 45]. En muchos casos, los resultados numéricos obtenidos con el modelo CFD se validan con mediciones experimentales [46, 47 y 48].

5. Estrategias empleadas en ventilación natural. Casos prácticos. Proyectos

La variedad y diversidad de sistemas y estrategias de ventilación natural que han sido propuestas en los últimos años es profusa [9, 49, 50, 51, 52, 53 y 54]. Las variantes de ventilación híbrida de estos sistemas añaden un nivel más de complejidad [55 y 56]. Sin embargo, cualquiera de las estrategias de ventilación natural se concibe como variante de tres fundamentales aproximaciones a la ventilación natural, basadas en las fuerzas que la impulsan: ventilación cruzada, basada en diferencias de presión debida al viento; ventilación debida a diferencia de densidades; y ventilación por una cara debida al flujo de aire inducido por turbulencia.

El flujo de aire generado en cualquier sistema real de ventilación natural es generado por una combinación de viento, diferencia de densidades o efectos de cambio de momento. Sin embargo, resulta útil considerar primero estas estrategias idealizadas de forma independiente.

5.1. Estrategia de ventilación cruzada debida al viento

La ventilación cruzada debida al viento es, quizás, la estrategia de ventilación natural más conocida. Aprovecha la diferencia de presiones debida al viento en dos caras opuestas de un edificio, barlovento y sotavento, que genera una diferencia de presión neta a través de la sección del edificio que genera el flujo de aire cruzado, figura 30.

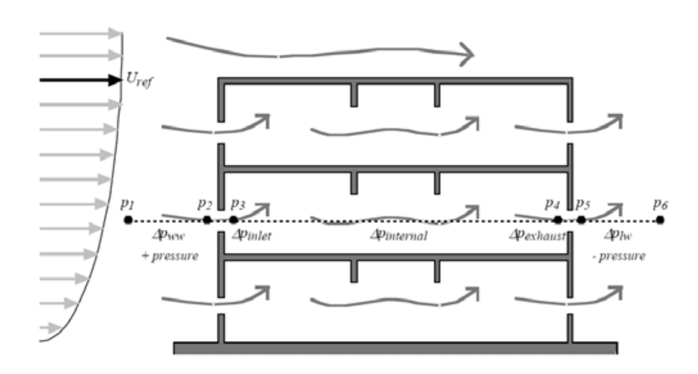


Fig.30. Estrategia de ventilación cruzada [57].

Analizando las diferencias de presión a lo largo de la trayectoria de flujo de aire debido a ventilación cruzada, se tienen 6 nodos de presión, según se muestra en la figura 30. Los nodos 1 y 6 corresponden a valores de presión ambiente en el lado de barlovento, P_1, y en el lado de sotavento, P_6. El cambio de presión del nodo 1 al nodo 2 será positivo. Mientras que el cambio de presión del nodo 5 al 6 será negativo, debido a la acción del viento. La diferencia de presión debida al viento disponible entre los nodos 1 y 6 se expresa como:

$$\Delta P_w = P_6 - P_1 \qquad [39]$$

Por otra parte, se consideran las resistencias al flujo de aire debidas a aperturas de entrada, obstrucciones internas, y aperturas de salida provocan caídas negativas de presión, $\Delta P_{entrada}$, $\Delta P_{\text{interna}}$, ΔP_{salida}, respectivamente:

$$\Delta P_{resistencias} = \Delta P_{entrada} + \Delta P_{\text{interna}} + \Delta P_{salida} \qquad [40]$$

Por tanto, la suma de las pérdidas de presión debidas a las resistencias al flujo de aire, ecuación 40, debe ser igual a la diferencia de presión debida al viento, ecuación 39.

Para unas condiciones típicas de diseño, la velocidad del viento puede considerarse en torno a 4 m/s. Los coeficientes de presión tienen valores típicos de +0,5 en la fachada de barlovento y de -0,5 en la fachada a sotavento. Para una densidad del aire de 1,2 kg/m^3, la diferencia de presión debida al viento, puede determinarse fácilmente aplicando la ecuación 12, obteniéndose un valor de 9,8 Pa.

Esta diferencia de presión es muy pequeña respecto a la de los sistemas de ventilación mecánica [58]. Por consiguiente, las pérdidas de presión de los sistemas de ventilación natural tendrán que ser relativamente pequeños respecto a las pérdidas en sistemas mecánicos de conductos.

Es importante señalar que la diferencia de presión debida al viento es independiente de las resistencias al flujo de aire. Si la resistencia es mayor, el flujo de aire en esa trayectoria será relativamente bajo; si la resistencia es pequeña, el flujo será relativamente mayor. En cada caso, la pérdida de presión debida a la resistencia al flujo debe ser igual a la diferencia de presión debida al viento.

Dado que las diferencias de presión debidas al viento tienen valores normalmente muy pequeños, es necesario reducir las resistencias al flujo de aire. En muchos sistemas de ventilación natural la resistencia de entrada es la encargada de controlar el flujo de aire, mientras que el resto de resistencias son reducidas al mínimo. Normalmente las aperturas corresponden a ventanas o a grandes huecos.

Como regla de diseño, se considera que la estrategia de ventilación cruzada es posible cuando la distancia interna existente entre las aperturas de ambas caras del edificio no sea superior a 5 veces la altura de la planta del edificio.

Cuando se intenta diseñar sistemas de ventilación natural para generar caudales de aire constantes, es necesario emplear una resistencia de flujo variable que mantiene constante el caudal de aire de ventilación independientemente de las variaciones en el cambio de presión debida al viento. Dado que estas variaciones de presión son inevitables, ya que están ligadas al cambio de magnitud y dirección del viento, los sistemas de ventilación natural basados en esta estrategia deben incluir aireadores o aperturas de ventilación con control de caudal [59 y 60]. De esta forma se obtiene un caudal de ventilación aproximadamente constante.

Cuando la velocidad del viento tiene valores muy bajos, la fuerza debida al viento se reduce, y el caudal de ventilación disminuye independientemente de la dirección del viento. El caso sin viento es la condición más crítica de todo sistema de ventilación natural cruzada debida al viento. Esta situación depende del potencial de viento existente en la zona climática donde esté situado el edificio, y puede asumirse si esta situación se produce de forma puntual [61]; en caso contrario, pueden combinarse con técnicas de ventilación híbrida [62].

Los modelos de cálculos empleados pueden introducir incertidumbres en la turbulencia del viento [63, 64 y 65], en los valores de los coeficientes de presión [66], potencial de viento [67 y 68], o en las resistencias de flujo [69 y 70]. A pesar de estos inconvenientes, la estrategia de ventilación cruzada debida al viento ha sido empleada en algunos edificios no residenciales. Tal es el caso del Queen's Building de la Universidad de Monfort, en Leicester, Inglaterra diseñado por los arquitectos Short Fort Associates y los ingenieros Max Fordham Associates [71 y 72], que será comentado en detalle más adelante.

5.2. Estrategia de ventilación debida a diferencia de densidades

La ventilación debida a diferencia de densidades es más sutil que la anterior. En términos cualitativos, aprovecha el movimiento del aire debido a diferencia de densidades por diferencia de temperaturas en el interior de un edificio.

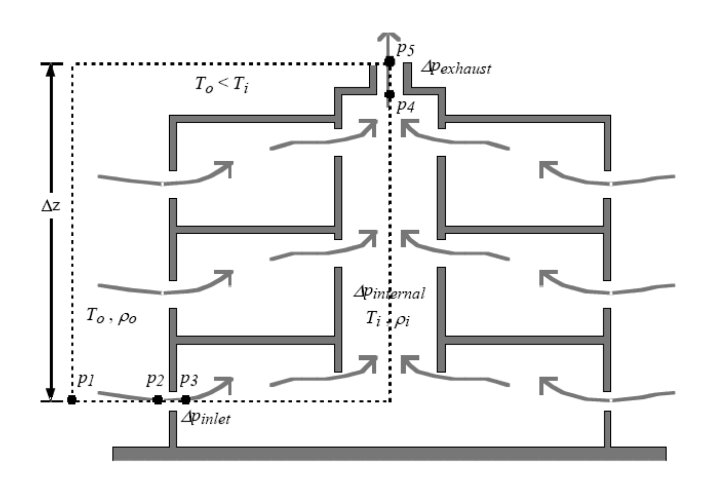


Fig.31. Estrategia de ventilación debida a diferencia de densidades [57].

De esta forma, el aire caliente que llega a la parte alta o el exterior del edificio, es enviado al exterior por los huecos de salida mientras que el aire fresco entra al edificio por la parte baja a través de las aperturas de entrada, como muestra la figura 31.

Si la temperatura del aire interior, T_i, es mayor que la temperatura del aire exterior, T_o, entonces la densidad del aire interior, ρ_i, será menor que la densidad del aire exterior, ρ_o. La diferencia de peso de la columna de aire interior y la correspondiente columna exterior creará una diferencia de presión, entre P_2 y P_3 que generará un flujo de aire.

Analizando en detalle el proceso se considera la trayectoria de flujo de aire desde el nodo de presión P_1 al nodo P_5 a través de los nodos P_2, P_3 y P_4 de la figura 31. El cambio de presión de nodo a nodo se completa cerrando el lazo de presión entre el nodo 5 y el 1. La suma algebraica de los cambios de presión en el lazo debe ser necesariamente cero.

En ausencia de viento, los cambios en la presión con la altura vienen dados por la ecuación 16. Aplicando esta ecuación al lazo de presión de la figura se obtiene la presión debida a diferencia de densidades:

$$\Delta P_s = (\rho_o - \rho_i) g \Delta z \quad [41]$$

Por otra parte, las resistencias al flujo de aire debidas a aperturas de entrada, obstrucciones internas, y aperturas de salida provocan caídas negativas de presión, $\Delta P_{entrada}$, $\Delta P_{\text{interna}}$, ΔP_{salida}, quedan definidas por la ecuación 40.

Por tanto, la suma de las resistencias al flujo de aire debe ser igual a la diferencia de presión debida a diferencia de densidades.

En este caso, para conseguir una diferencia de presión de 10 Pa, típica de ventilación debida a viento, en los casos de ventilación debida a diferencia de densidades para una temperatura interior de 23ºC, la temperatura del aire exterior de un edificio de tres alturas, ó 10 m de alto, debería estar próxima a 0ºC.

Por tanto, durante los periodos en los que la temperatura exterior sea cálida, verano, las diferencias de presión debida a diferencia de densidades para edificios de mediana altura serán mucho menores que las debidas a la acción del viento. Además en las plantas altas del edificio, la diferencia de presión disponible será proporcionalmente menor. Por esta razón, la ventilación debida a diferencia de densidades no es una estrategia efectiva para enfriamiento.

En época de invierno, cuando las diferencias de temperatura interior exterior sean mayores, la ventilación debida a diferencia de densidades puede ser efectiva aunque las diferencias de distribución de aire en cada planta deben tenerse en cuenta para dimensionar adecuadamente el tamaño de las aperturas de entrada.

En la práctica puede incrementarse el potencial de ventilación debida a diferencia de densidades aumentando la altura entre la apertura de entrada y de salida, como en el caso de edificios de gran altura, empleando para ello los huecos de escalera.

5.3. Estrategia de ventilación combinada debida a viento y a diferencia de densidades

En la mayor parte de los casos, la solución combina la estrategia de ventilación debida al viento con la debida a diferencia de densidades.

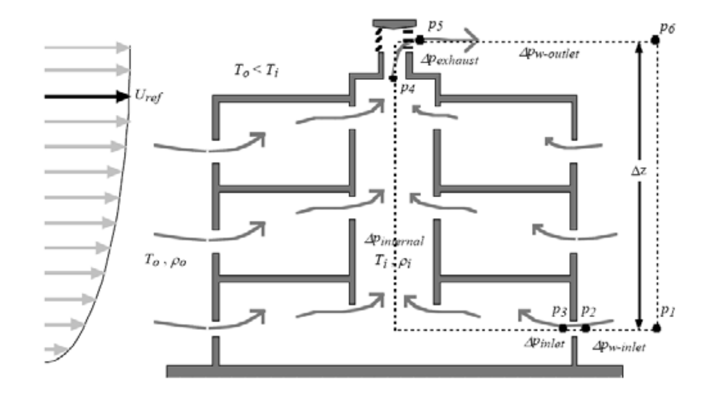


Fig.32. Estrategia de ventilación combinada debida a viento y a diferencia de densidades [57].

Se considera un sistema de este tipo bajo la influencia del viento y la diferencia de densidades, figura 32. Este sistema es similar al de la figura 31 con un captador de viento añadido que produce el denominado efecto chimenea. El captador de viento responde a la dirección de viento dominante para aumentar la presión negativa inducida por el viento, por ejemplo con compuertas o láminas giratorias.

Considerando el lazo de presiones de la figura, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 y P_1, la suma de la diferencia de presión debida al viento y a la diferencia de densidades debe igualar a la suma de las resistencias del flujo:

$$\Delta P_w + \Delta P_s = \Delta P_{resistencias} \qquad [42]$$

Donde la suma de las resistencias al flujo viene dada por la ecuación 40. En este caso, la suma de las presiones debidas al viento y a la diferencia densidades debe ser igual a la suma de las resistencias al flujo de aire.

Las ecuaciones correspondientes a los otros cinco lazos de presión de la figura 32 tendrán una forma similar a la ecuación 42 pero los valores de sus términos serán diferentes.

Para el lazo de presión representado en la figura 32, tanto el coeficiente de presión de la entrada como el de la salida son negativos debido a que están en la fachada de sotavento del edificio. En consecuencia, la diferencia de presión debida al viento generará flujo de aire sólo si el valor absoluto de la salida es mayor que el valor de entrada. Por esta razón, las diferencias de presión debidas al viento, de las zonas del edificio situadas en la fachada de sotavento tienden a ser menores que las que se encuentran en las zonas de barlovento. A menos que las aperturas de entrada se diseñen adecuadamente, el resultado es que los caudales de aire de ventilación son menores en esas zonas, y el flujo puede invertirse en determinadas condiciones.

Las aperturas de ventilación con control de caudal o aireadores, [59 y 60], pueden ayudar a mantener los caudales de ventilación de diseño, y, por tanto, a mitigar este problema, aunque no pueden evitar el flujo invertido o generar flujo cuando la presión total disponible $\Delta P_w + \Delta P_s$ cae a cero.

La diferencia de presión debida a diferencia de densidades, ΔP_s actúa para compensar presiones debidas al viento bajas o inversas, pero de nuevo esta contribución será menor en las plantas altas del edificio. En consecuencia, las plantas superiores obtienen menores diferencias de presión y, por tanto, menores caudales de ventilación.

Los captadores de viento que se instalan sobre la cubierta, [73 y 74], ver figura 33, tienden a crear presiones negativas, independientemente de la dirección del viento. A modo de ejemplo, la figura 34 muestra los resultados del ensayo experimental de un captador de viento de sección cuadrada. Se observa que el caudal de aire que se obtiene en función de la velocidad se mantiene aproximadamente constante cuando varía el ángulo de incidencia del viento.

Fig.33. Captador de viento de sección circular y cuadrada [73 y 74].

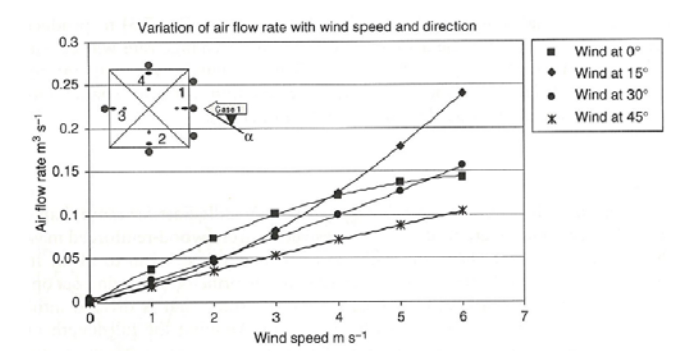


Fig.34. Captador de viento de sección cuadrada. Relación entre velocidad de viento, ángulo de incidencia y flujo de aire inducido [75].

Los sistemas de ventilación combinada con efecto chimenea mejoran el comportamiento de los sistemas de ventilación cruzada comentados anteriormente y proporcionan caudales de aire similares en las distintas zonas del edificio. Por este motivo, los sistemas combinados han sido muy utilizados en los últimos años en edificios comerciales y un gran número de fabricantes han desarrollado nuevos productos y componentes para dar servicio a estos sistemas.

Los sistemas de ventilación combinada con efecto chimenea proporcionan ventilación a todo el edificio. Dependiendo de la forma externa del edificio y su geometría interna, proporcionan una solución de ventilación integral. Por el contrario, los sistemas de ventilación cruzada proporcionan ventilación a un local, o a una planta del edificio. Cuando se requiere ventilación para habitaciones individuales, se emplea la ventilación por una cara, que es la más localizada de todas las estrategias de ventilación.

5.4. Estrategia de ventilación por una cara

Al hablar de ventilación natural es frecuente pensar en el caso de la apertura de una ventana para permitir que el aire exterior entre al interior de una habitación. Esta aproximación a la ventilación natural es la forma más simple de la denominada ventilación natural por una cara. En comparación con las estrategias descritas anteriormente, es el medio menos efectivo de ventilación natural.

Para una mejor comprensión de esta y otras estrategias de ventilación por una cara se considera la sección del edificio de la figura 35.

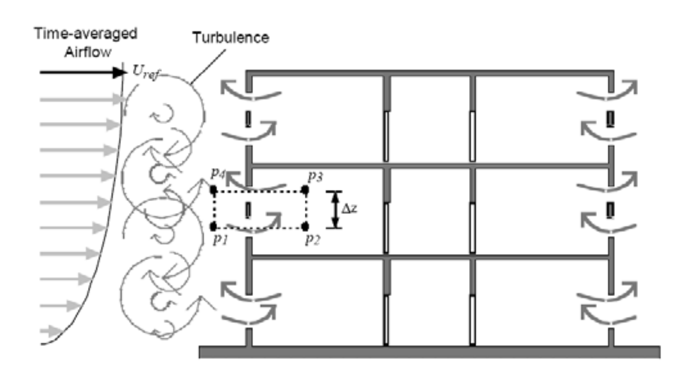


Fig.35. Estrategia de ventilación por una cara con flujo inducido por turbulencias. [75].

La estrategia de ventilación por una cara a través de una apertura simple, como una ventana, se representa en la figura 35 en la planta baja. La explicación macroscópica que se aplicó a estrategias anteriores para explicar sus particularidades no proporciona una explicación adecuada en este caso. Las presiones promediadas en el tiempo debidas al viento que actúan en las trayectorias de entrada y salida son de magnitud y dirección similar, por consiguiente, no pueden tenerse en cuenta para flujos de ventilación por una sola cara.

Los modelos de flujo de grandes aperturas desarrollados para análisis macroscópico [76, 77, 78] pueden resultar de utilidad. Sin embargo, dado que el carácter básico del flujo es microscópico, son necesarios métodos que resuelven estos detalles, como los métodos zonales [79, 80] o los métodos CFD [81, 82].

Aunque la naturaleza de la ventilación por una cara no ha sido totalmente descrita desde el punto de vista teórico, es evidente que la turbulencia del flujo puede inducir pequeñas diferencias en la presión sobre la envolvente del edificio, que generan flujo de aire. Algunos ensayos de visualización de flujo muestran que las turbulencias de pequeña escala generan entradas de aire a través de una parte de la sección de una ventana y salidas de aire por otra parte de la sección [83]. Ambos mecanismos son variables y poco efectivos. Como regla de diseño puede aplicarse que la ventilación por una cara con una sola apertura, tiene una distancia efectiva horizontal desde la apertura, inferior a 2,5 veces la altura del local [53].

La estrategia de ventilación por una cara puede mejorarse si se emplean dos o más aperturas. En estas situaciones es posible aplicar el análisis de lazo a la ventilación por una cara mediante múltiples aperturas, como la que se muestra en la segunda planta de la sección del edificio de la figura 35.

Si las aperturas se sitúan a diferentes alturas, las diferencias de presión debidas a diferencia de densidades pueden actuar mejorando el caudal de ventilación, aunque dada la relativamente pequeña diferencia de alturas las diferencias de presión generadas son pequeñas.

El diseño detallado de estas aperturas puede mejorar el aprovechamiento de las fuerzas debidas a la presión que actúan sobre la envolvente en las trayectorias de entrada y salida, generando flujo de aire. Las fuerzas debidas a la diferencia de presión generadas en esta estrategia, son, en general, más pequeñas que las generadas en las de flujo cruzado o en la estrategia combinada con efecto chimenea.

Por tanto, la estrategia de ventilación por una cara ofrece la solución de enfriamiento por ventilación menos efectiva, durante periodos cálidos, verano, aunque puede emplearse en habitaciones individuales. Cuando las temperaturas del aire exterior son bajas y los efectos de la diferencia de densidades son significativos, la estrategia de ventilación por una cara es un método rápido y directo de ventilar una habitación, a través de la sección de una ventana abierta, con una entrada de aire a través de la zona baja de la sección que fuerza la salida de aire por la zona alta de la sección.

Esta estrategia de ventilación ha sido empleada tradicionalmente para ventilar escuelas públicas en Europa, resultando ser en algunos casos más efectivas que los sistemas de ventilación mecánica [83] y es un área de interés en trabajos de investigación de los últimos años [78,79].

5.5. Aplicación de las estrategias de ventilación a edificios

Los edificios que se diseñan con criterios de ventilación natural emplean combinaciones de las estrategias descritas anteriormente. En algunos casos, las tres estrategias se emplean de forma concurrente en un único edificio para satisfacer las necesidades de ventilación locales y globales del edificio. Uno de los ejemplos más conocidos de este esquema es el edificio Queen de la Universidad de Monfort en Leicester, Inglaterra [71, 72]. Se trata de un edificio de 10.000 m^2 para uso docente, que alberga la Escuela de Ingeniería. El edificio ha sido diseñado por el estudio de arquitectura Short Ford Asociados. La figura 36 muestra esquemáticamente las estrategias empleadas en este edificio: ventilación cruzada en las plantas inferiores; ventilación con efecto chimenea en las plantas intermedias; ventilación por una cara en algunos locales de la planta alta.

Una de las características de este edificio es la utilización de chimeneas o captadores de viento de gran altura, lo que se refleja en el aspecto exterior del edificio, como muestra la imagen recogida en la figura 37.

El edificio dispone de varias zonas. Su zona central actúa como masa térmica para los espacios contiguos. En la planta baja y el auditorio se emplea ventilación por efecto chimenea. Las zonas de laboratorios y despachos de las plantas superiores son ventilados con ayuda de los captadores de viento situados en la cubierta, ver figura 38.

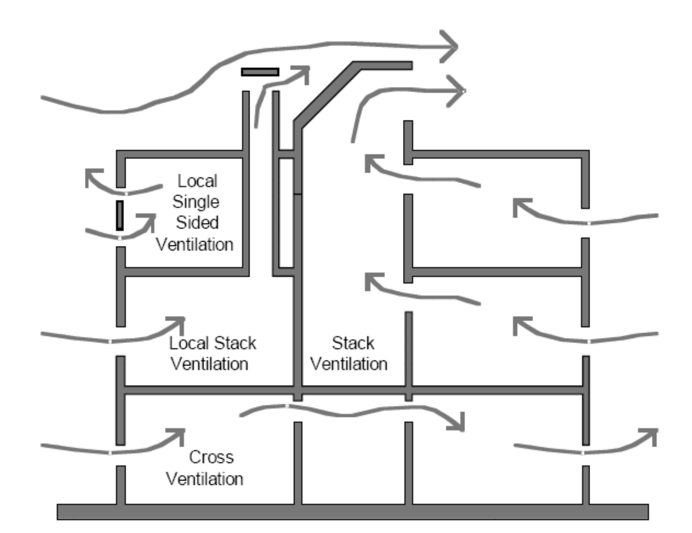


Fig.36. Estrategia mixtas de ventilación natural en un único edificio [75].



Fig.37. Edificio Queen de la Universidad de Monfort, Leicester [84].

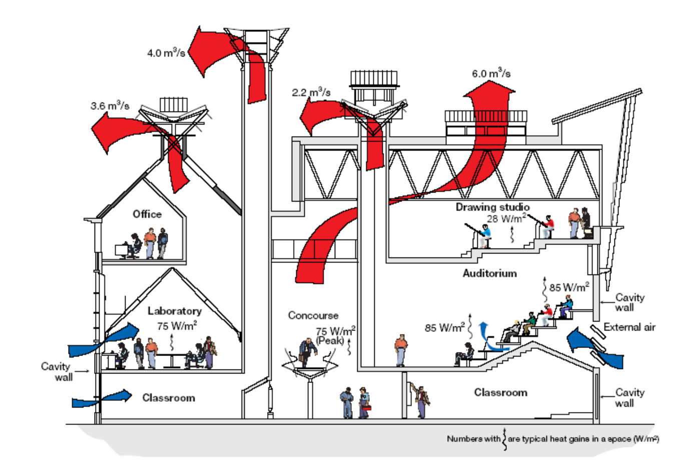


Fig.38. Estrategia de ventilación natural en el módulo central del edificio Queen [85].

Otro caso a estudio de interés en la aplicación de las estrategias de ventilación natural es el edificio de oficinas Environmental Building perteneciente al Building Research Establishment BRE, localizado en Garston, Watford, Reino Unido.

Se trata de un edificio de 1350 m^2 de oficinas diseñado para consumir un 30% menos de energía que los existentes edificios de oficinas construidos con criterios de buenas prácticas. Fue diseñado por el estudio de arquitectura Feilden Clegg Bradley [86]. La figura 39 muestra el aspecto general exterior del edificio.

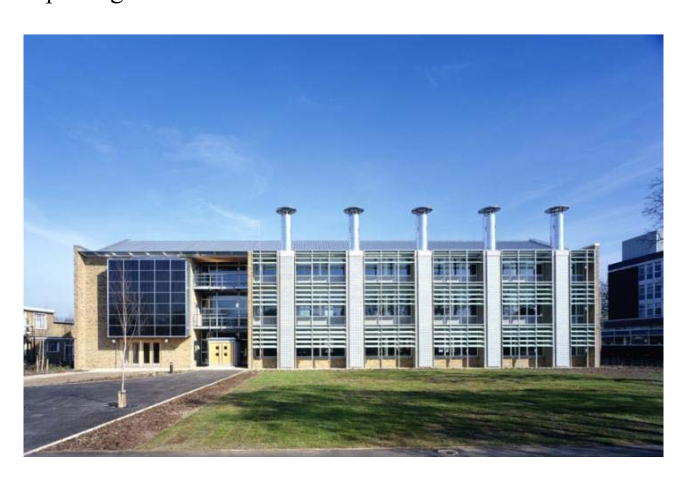


Fig.39. Edificio Environmental Building del BRE [87].

La característica más destacable del edificio en el apartado de ventilación natural son las cinco torres destinadas a inducir ventilación por efecto chimenea. Estas torres tienen un papel importante en el sistema de ventilación natural del edificio. Se emplea la estrategia de ventilación cruzada debido a la anchura reducida del mismo. Las torres aseguran el enfriamiento del edificio mediante ventilación en periodo de verano, en los días donde no hay viento, empleando en este caso estrategia de ventilación natural combinada según el esquema que muestra la figura 40.

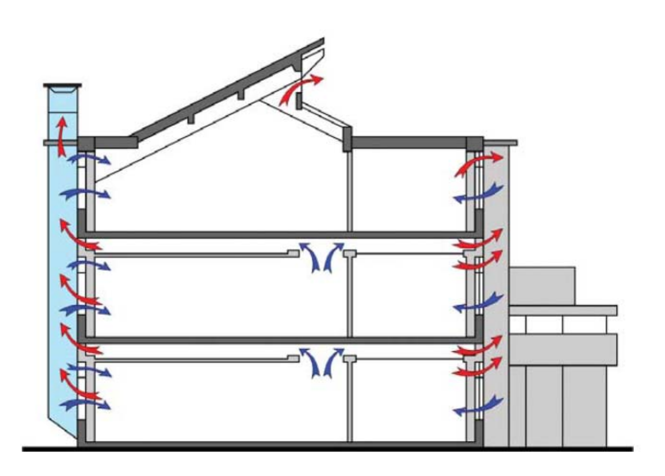
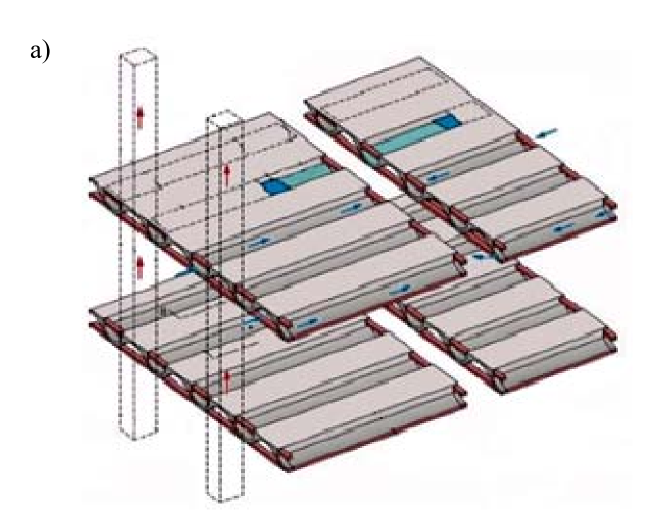


Fig.40. Estrategia de ventilación natural combinada en un día de verano en ausencia de viento en el edificio Environmental Building del BRE [88].

El forjado curvado también juega un papel importante ya que los huecos se emplean para circulación de aire techo/suelo proporcionando aire precalentado o preenfriado a los espacios de oficinas. El forjado dispone de tramas radiantes de agua atendidas por una instalación térmica combinada con pozos de geotermia para acumular frío o calor según sea necesario. La figura 41 muestra detalles del forjado ventilado y su conexión con las torres de ventilación.

a)



b)

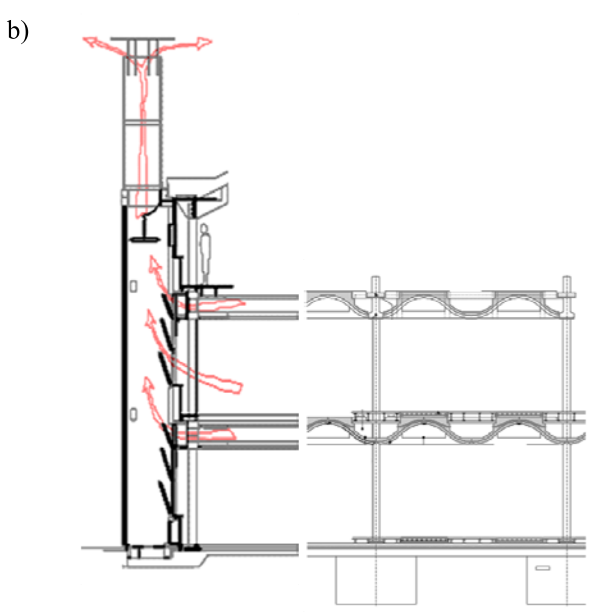


Fig.41. Estrategia de ventilación natural mediante forjado ventilado. a) Vista isométrica y b) alzados [88].

La estrategia de ventilación natural empleada en el edificio, en combinación con otras medidas de eficiencia energética como el control solar, el uso de iluminación natural y el apoyo de energía solar fotovoltaica, permite reducir a menos de la mitad las emisiones de CO_2 a la atmósfera, respecto a un edificio de oficinas típico, figura 42.

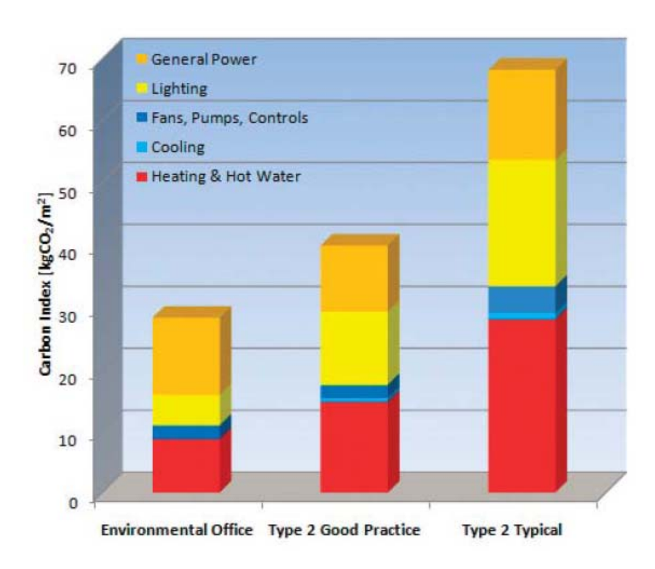


Fig.42. Emisiones de CO_2 en kg CO_2/m^2 comparadas con otros edificios de oficinas [88].

5.6. Otras estrategias. Ventilación natural inducida por radiación solar

Los sistemas de ventilación natural deben prever estrategias que aseguren los caudales de ventilación necesarios en condiciones poco o nulo viento o en situaciones donde la diferencia de densidades no sea demasiado elevada. Como se ha comentado anteriormente una posibilidad es emplear dispositivos que fomenten el efecto chimenea, tales como atrios, captadores de viento o chimeneas de ventilación en altura.

Otra posibilidad la ofrecen los sistemas de ventilación natural inducidos por radiación solar, que en muchos casos puede ser una alternativa viable. Esta estrategia se basa en el calentamiento de parte de la masa del edificio por la radiación solar. De esta forma, se producen temperaturas del aire más altas en determinadas zonas, las cuales generan diferencias de presiones mayores que las que se obtienen con la estrategia de diferencia de densidades, que solo dependen de la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior.

Entre los sistemas de ventilación natural asistidos por radiación solar, se encuentran los sistemas de ventilación inducidos por muros Trombe, las chimeneas solares y los tejados solares. Los muros Trombe incorporan elementos transparentes al muro para absorber parte de la radiación solar incidente a la estructura del cerramiento. Las chimeneas solares y los tejados solares captan energía y la almacenan en la pared de la chimenea o sobre la cubierta del edificio respectivamente.

La ventilación inducida por radiación solar es generada por la diferencia de densidades al emplear un colector de aire solar. Las ecuaciones vistas en las apartados 3.2 a 3.7 son aplicables a estos sistemas, reemplazando la temperatura del aire exterior por la temperatura del aire a la salida del colector. Además hay que considerar las pérdidas de presión a través del colector, y las pérdidas de presión en las aperturas de entrada y salida. La temperatura de salida de un colector solar viene dada por [89]:

$$T_e = A/B + \left[T_i - A/B\right]\exp\left\{-BwH/\left(\rho_e c_p Q\right)\right\} \qquad [43]$$

Donde $A = h_1 T_{w1} + h_2 T_{w2}$, $B = h_1 + h_2$; h_1 y h_2 son los coeficientes de transferencia de calor para las superficies internas del canal; T_{w1} y T_{w2} son las temperaturas de las superficies internas del canal; T_i es la temperatura del aire a la entrada del canal, en ºC; Q es el caudal volumétrico de de aire, en m^3/s; ρ_e es la densidad del aire a la salida, en kg/m^3; c_p es el calor específico del aire, en kJ/kg K.

Los coeficientes de transferencia de calor, h_1 y h_2 se obtienen usando:

$$Nu = 0{,}1 Ra^{1/3} \qquad [44]$$

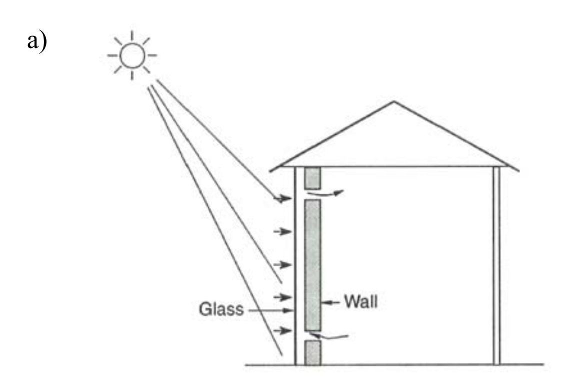
Donde $Nu = hH/k$ es el número de Nusselt; $Ra = \Pr Gr$ es el número de Rayleigh; $\Pr = \mu c_p / k$ es el número de Prandtl; $Gr = g\beta H^3\left(T_w - T_i\right)/\nu$ es el número de Grashof; μ es la viscosidad dinámica del aire, en kg/m s; k es la conductividad térmica del aire, en W/m K; ν es la viscosidad cinemática del aire, en m^2/s; β es el coeficiente de expansión del aire, $\beta \approx 1/T_i$, en 1/K.

La ecuación 44 se aplica a superficies verticales y moderadamente inclinadas, hasta 30º con la vertical para el rango de $10^9 < Ra < 10^{13}$.

Las ecuaciones 13, 21 y 43 pueden emplearse simultáneamente para determinar el caudal de aire producido por el colector solar [89, 90].

Los sistemas de ventilación basados en muros Trombe consisten en una pared de moderado espesor con aperturas en la parte superior e inferior, cubiertas externamente por una placa exterior, habitualmente de vidrio, ver figura 43a. Cuando se expone a la radiación solar, el aire asciende por el canal vertical, que tiene una anchura de entre 50 y 100 mm. Conectando la salida superior del colector a la habitación, el aire caliente entra en el local, induciendo la entrada de aire frío por la entrada inferior. En situación de invierno, esta estrategia proporciona ventilación y aire caliente al edificio. En situación de verano es posible conectar la salida superior del sistema al exterior, figura 43b, y practicar una entrada de aire exterior en la habitación. En estas condiciones, el sistema realiza la ventilación de la habitación, extrayendo el aire al exterior.

a)



b)

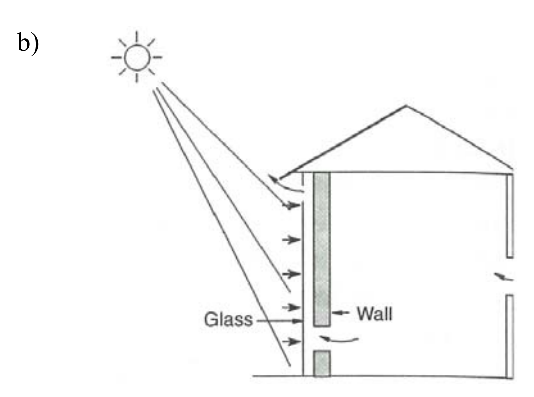
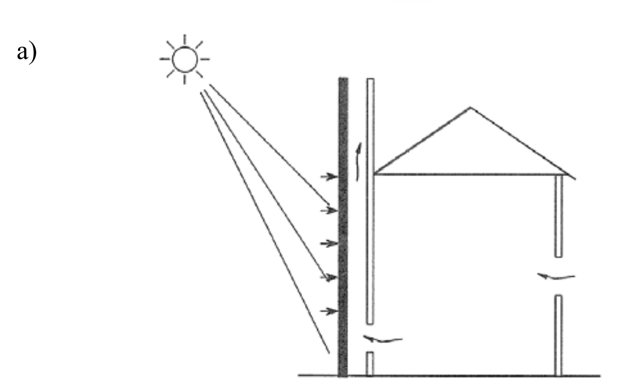


Fig.43. Ventilación inducida por muro Trombe; a) calentamiento en invierno; b) ventilación en verano [2].

a)



b)



Fig.44. Ventilación inducida por chimenea solar a) esquema [2]; b) chimenea solar en la escuela Tånga en Falkenberg Suecia [95].

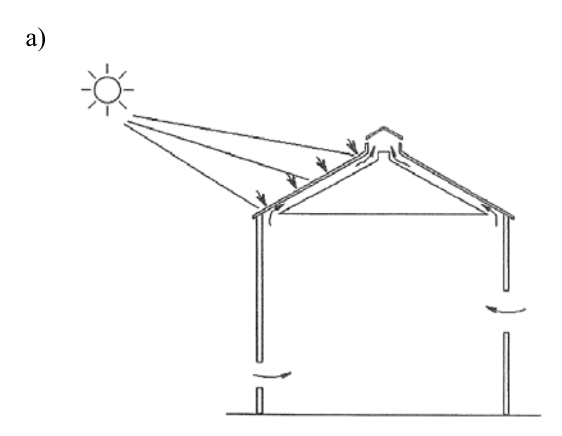
Aunque el proceso de cálculo permite determinar el caudal de aire, diferentes autores proponen métodos de cálculo alternativo para evaluar el potencial de ventilación de estos sistemas, incluyendo las denominadas fachadas ventiladas [91, 92 y 93]. Estudios experimentales han descrito que estos sistemas pueden aportan hasta el 20% de las necesidades energéticas para ventilación [94].

Una chimenea solar acoplada a un cerramiento orientado hacia el sur-suroeste se calienta por efecto de la radiación solar. El calor almacenado en la propia chimenea es empleado para inducir ventilación, figura 44a. La temperatura superficial interior de la chimenea calienta el aire, generando una ventilación inducida por diferencia de densidades, que mueve el aire desde el interior del edificio hacia el exterior. La figura 44 b muestra un caso práctico de ventilación natural mediante chimeneas solares correspondiente a la escuela de Tånga en Falkenberg, Suecia [95].

El diseño de las chimeneas solares debe prestar especial atención a la anchura de la sección de la chimenea. Cuando la sección aumenta, el caudal de aire tiende a aumentar. Sin embargo, cuando se emplean secciones mayores el flujo de aire puede disminuir. Algunos trabajos experimentales han descrito que la anchura óptima de la chimenea está en torno a 200 mm [95].

En climas donde la latitud solar es elevada, los sistemas de ventilación natural basados en muros Trombe o chimeneas solares pueden ser poco efectivos y, por tanto, los caudales de ventilación que se obtienen con ellos son limitados. En esta situación, un colector de tejado con pendiente puede absorber más energía solar.

a)



b)

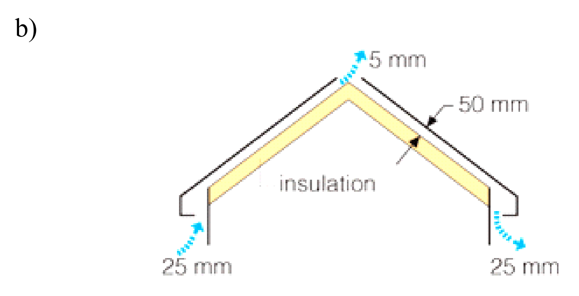


Fig.45. Ventilación inducida por tejado solar a) esquema [2]; b) disposición típica.

Aunque debido a la pendiente del tejado, la altura del colector será pequeña. La disposición esquemática de un colector solar de tejado se muestra en la figura 45.

La ventaja del colector de tejado es que hay disponible una mayor superficie colectora, por lo que se obtienen

temperaturas de salida de aire más elevadas, que las de los casos anteriores. En muchos casos los caudales de ventilación que se obtienen con colectores solares de tejado son mayores que los obtenidos mediante chimeneas solares o muros Trombe, en función del diseño y de la zona climática [96, 97, 98 y 99].

6. Estrategias de diseño en ventilación natural en Edificios

Los principios de diseño de ventilación natural e híbrida en edificios son relativamente sencillos, y relacionados con las fuerzas debidas al viento, a la diferencia de densidades y a los ventiladores. En el apartado anterior se han comentado algunas directrices relacionadas con las estrategias de ventilación natural. Sin embargo, su aplicación concreta a un edificio, es una tarea más compleja, debido a que deben aplicarse diferentes principios de ventilación al mismo tiempo con el objetivo de aprovechar al máximo el potencial de ventilación natural.

6.1. Conceptos en ventilación natural

El diseñador debe tener presente los cinco conceptos que definen y describen la ventilación natural e híbrida [100]. Estos conceptos se refieren a: la fuerza que genera la ventilación, el principio de ventilación, el sistema de distribución de aire, los elementos de ventilación, la geometría del edificio y las trayectorias de flujo de aire. La tabla 6 muestra los conceptos y parámetros característicos que intervienen.

Tabla 6
Conceptos y parámetros característicos en ventilación natural, [100]

Concepto	Parámetro característico
Fuerza que genera la ventilación	Diferencia de densidades
	Viento
	Ventilador
	Combinación de fuerzas
Estrategia de ventilación natural	Una cara
	Cruzada
	Efecto chimenea
Sistema de distribución de aire	Mezcla
	Desplazamiento
Elemento de ventilación	Apertura en fachada
	Torre o captador de viento
	Chimenea
	Conductos de baja presión
	Atrio
	Ventilador de baja presión
	Pleno o plenum
Geometría del edificio	Altura baja, media o alta
	Compacto
	Distribuido
Trayectorias de flujo de aire	Local
	Central

Los aspectos relacionados con las fuerzas impulsoras del aire o las estrategias de ventilación ya han sido tratados en apartados anteriores.

Los elementos de ventilación son los componentes del sistema de ventilación natural de acuerdo con la estrategia planteada en cada caso. La selección de cada uno de estos elementos conlleva una serie de consecuencias y posibilidades, por lo que se requiere por parte del ingeniero o arquitecto un conocimiento en detalle del mismo. Los elementos de ventilación más importantes son las aperturas en fachada, ventanas y sus tipos, persianas, elementos de aireación, aireadores, torres de viento, captadores de viento, chimeneas, dobles fachadas, atrios, o los conductos embebidos, entre otros. En la bibliografía puede encontrarse un análisis exhaustivo de cada uno de ellos [101].

Las características de las fuerzas que generan la ventilación natural están influenciadas por la altura del edificio, lo que conlleva la utilización de conceptos de ventilación natural diferentes. La magnitud y dirección del viento presentan más estabilidad y están menos influenciadas por el tipo de terreno, a partir de una cierta distancia del suelo. La distancia vertical entre la apertura de entrada y la de salida es relevante para el caso de utilización de ventilación por diferencia de densidades. Por consiguiente, los edificios altos tienden a emplear otros elementos de ventilación y principios que los edificios bajos. En la literatura [49] pueden encontrarse casos de ventilación para edificios altos, más de 10 alturas, edificios de media altura, de 3 a 6 alturas y edificios bajos, de 1 a 2 alturas.

La geometría del edificio está ligada también a los principios de ventilación empleados. Edificios con morfología distribuida o lineal, tienden a emplear estrategias de ventilación por una cara o ventilación cruzada. Mientras que en el caso de edificios compactos se emplea ventilación por efecto chimenea, mediante chimeneas o atrios [49].

La posición de las aperturas de entrada y salida del aire marca la trayectoria que realiza el aire de ventilación entre el exterior y los espacios ocupados del edificio. Si las aperturas de entrada y salida son de tipo local, deben disponerse varios de estos elementos en la fachada del edificio. Si se emplean aperturas de entrada y salida centrales, debe preverse la trayectoria para distribuir el aire al resto de zonas. Los sistemas centrales permiten tratar el aire de forma más efectiva que los sistemas locales, empleando sistemas de recuperación de calor o filtrado del aire. En muchos casos, se debe combinar la ventilación natural con ventiladores, empleando técnicas de ventilación híbrida [62].

6.2. Restricciones al diseño en ventilación natural

La ventilación natural juega un papel importante en el control de la calidad de aire interior y, en algunos casos, al control de la temperatura interior cuando se emplea la combinación de estrategias y conceptos adecuada. Sin embargo, el éxito del diseño planteado sólo es posible

cuando se salvan algunos obstáculos que surgen en las diferentes fases de diseño. Por lo tanto, es interesante analizar las barreras potenciales que pueden encontrarse en las fases de diseño y de uso del edificio relacionadas con los sistemas de ventilación natural. La tabla 7 resume algunas de las más significativas. Estas barreras han sido analizadas y discutidas en profundidad [47, 62, 103].

Tabla 7
Resumen de las barreras potenciales existentes en la aplicación de ventilación natural a edificios, [47]

Fase del edificio	Barrera potencial
Fase de diseño	Normativa contraincendios y de acústica
	Uso del edificio
	Sistema de control
	Herramientas de diseño
Fase de uso	Seguridad
	Ruido y contaminación del aire
	Sombreamiento
	Incomodidad por corrientes de aire
	Desconocimiento del usuario
Otros	Impacto en la arquitectura
	Ausencia de normativa reguladora
	Mayor riesgo para el diseñador
	Sobrecoste

6.3. Ventajas de la ventilación natural

Hay muchas motivaciones para usar ventilación natural en los edificios. Las más obvias se refieren a la mejora en la calidad de aire interior y satisfacción de los ocupantes y al menor uso de energía e impacto medioambiental.

Los edificios con ventilación natural tienen una menor relación con patologías relacionadas con el síndrome del edificio enfermo que los edificios con ventilación mecánica. Los resultados de un estudio [104] comparado entre cinco edificios de oficinas ventilados mecánicamente y cuatro edificios de oficinas ventilados de forma natural, indican que los ocupantes de los edificios ventilados de forma natural, tienen una menor prevalencia de síntomas que los ocupantes de edificios ventilados mecánicamente. En este estudio el 60% de los ocupantes de los edificios ventilados de forma natural preferían no cambiar el sistema de ventilación, frente al 41% de los ocupantes en el caso de los edificios ventilados mecánicamente.

La reducción del uso de energía y la reducción del impacto medioambiental pueden obtenerse en un gran número de edificios, debido a la reducción sustancial de la energía asociada al uso de ventiladores y sistemas de refrigeración [62].

Los ahorros energéticos de los sistemas de ventilación natural frente a los de sistemas mecánicos tradicionales han sido analizados en distintos estudios. Dependiendo de los casos se han encontrado ahorros de entre el 20% y el 50% [62, 105].

6.4. Directrices de diseño en ventilación natural

El diseño de un sistema de ventilación natural es una solución para cada edificio en particular. El objetivo básico consiste en emplear de forma óptima las fuerzas naturales a la vez que se reducen las pérdidas de presión en el sistema. Pero también deben considerarse los aspectos relacionados con el confort térmico, la mejora de calidad de aire interior y el ahorro energético. La tabla 8 resume estas recomendaciones.

Tabla 8
Resumen de las recomendaciones de diseño para ventilación natural de edificios, [49, 62, 101]

Directriz	Recomendaciones
Maximizar las fuerzas que originan la ventilación natural	Aumentar distancia vertical entre entrada y salida aire
	Localizar entradas de aire en fachadas con viento dominante
	Utilizar tecnologías solares o de viento para aumentar el efecto de viento o por diferencia de densidades: chimeneas solares, captadores de viento
Confort térmico	Usar la ventilación tanto como sea posible evitando velocidades o gradientes de T excesivos
	En climas templados emplear la ventilación nocturna en estaciones intermedias
	Evitar ventilación natural con temperaturas ambientes excesivas
	Emplear rejillas autorregulables para evitar velocidades excesivas, especialmente en climas fríos
Mejora de calidad de aire interior	Considerar el control bajo demanda para conseguir máxima calidad de aire con mínimo coste energético ajustando los flujos de aire
	En casos de emisiones elevadas de contaminantes asegurar que pequeños flujos de aire conseguirán niveles adecuados de calidad de aire
	En ambientes urbanos considerar sistemas de control de contaminantes
	Localizar entradas de aire en fachadas con ambiente menos contaminado
Ahorro energético	Minimizar flujos de aire manteniendo la calidad de aire interior. Control bajo demanda CO_2
	Explotar las fuerzas naturales de viento y diferencia de densidades en periodos que no demanda energía
	Combinar la ventilación natural con ventilación mecánica y ventiladores alta eficiencia
	Emplear la ventilación híbrida con recuperación de energía
	Integrar en el sistema de control parámetros de calidad de aire, bajo flujo de aire y rendimiento de ventilador

Las directrices y criterios para el diseño de ventilación natural incluyen distintas directrices y reglas de oro que se estructuran en torno a cuatro apartados que se exponen brevemente a continuación.

6.4.1. Directrices de diseño. Localización

La localización, orientación y disposición del edificio en relación a su entorno contribuyen al potencial de ventilación natural. En este apartado se debe valorar el compromiso entre invierno y verano, las posibles obstrucciones al viento, el *discomfort* debido a condiciones de temperatura exterior inadecuadas o altas velocidades, o la entrada de aire con contaminantes o polvo, entre otros.

6.4.2. Directrices de diseño. Programación del diseño

Incluye la información necesaria durante la fase de programación del diseño e incluye aspectos como el uso del edificio, el tipo de espacio a ventilar, el horario de uso de cada espacio, la zona climática, la carga térmica del local, el tipo de estructura del edificio y su masa térmica.

Estos detalles permiten definir, entre otros, las necesidades de ventilación del edificio, punto de partida del diseño del sistema de ventilación natural.

6.4.3. Directrices de diseño. Diseño del edificio

El diseño de un edificio para ventilación natural, debe prestar atención a varios aspectos relacionados con el movimiento de aire alrededor y dentro del mismo.

Los aspectos de diseño del edificio relativos al movimiento del aire pueden agruparse según su relación con la forma de la envolvente del edificio, la distribución interna, las dimensiones y localización de las aperturas, las características y dimensiones de la masa térmica expuesta y las interacciones con el sistema de climatización.

6.4.4. Directrices de diseño. Diseño de aperturas

En este apartado se consideran aspectos relativos a la selección de los tipos de aperturas y componentes del sistema así como a su operación y control.

6.5. Etapas de diseño en ventilación natural

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta aquí y con idea de sintetizar los pasos a realizar en el diseño de sistemas de ventilación natural, se plantea una sencilla guía de diseño en formato de ocho etapas:

- Establecer las especificaciones de diseño.
- Identificar los usos del edificio y sus particularidades.
- Determinar las necesidades de ventilación.
- Estimar las presiones externas debidas al viento.
- Planificar las trayectorias de aire.
- Seleccionar los elementos de ventilación.
- Dimensionar los elementos de ventilación.
- Analizar el diseño.

7. Conclusiones

Las posibilidades de aplicación de ventilación natural a edificios son enormes en el horizonte de edificios de consumo casi nulo. El reto de diseñar sistemas de ventilación natural que contribuyan a reducir el impacto de los edificios en nuestro entorno requiere conocer en detalle los fundamentos de ventilación natural en edificios.

En este capítulo, han sido descritos en detalle los fundamentos de la ventilación natural. Se han presentado los principios y metodologías empleadas para determinar los caudales de ventilación debida al viento, a diferencia de densidades o ventilación combinada.

Se han revisado las metodologías de cálculo de los sistemas de ventilación basados en distintos métodos empíricos, como los de BS [6] o ASHRAE [22]. También se han descrito los métodos de cálculo basado en modelos nodales y en métodos de CFD, desarrollando ejemplos en cada caso.

Se han abordado las estrategias empleadas en ventilación natural describiendo sus fundamentos teóricos y el ámbito de aplicación. Así mismo se han descrito algunos casos a estudio de edificios con sistemas de ventilación natural.

Se han discutido las pautas de diseño que deben considerarse a la hora de llevar a la práctica los conceptos, criterios y estrategias expuestos.

Sirva todo lo anterior para facilitar la comprensión de los fundamentos de la ventilación natural en edificios.

Glosario

Aireador: elemento que permite el flujo de aire entre el exterior del edificio y el interior o bien entre espacios interiores para garantizar un caudal de ventilación.
Aire de impulsión: aire que se impulsa a un espacio para ventilar, calentar, enfriar, humidificar o deshumidificar.
Aire de retorno: aire que es extraído de un espacio. Una proporción se usa para recircularlo de nuevo al local y otra es expulsada al exterior del edificio.
Aire exterior: aire que se toma del exterior del edificio para ser llevado al interior del mismo.
Aire extraído: aire extraído de un espacio que no va a ser impulsado de nuevo al mismo.
Aire recirculado: aire extraído de un espacio que es enviado de nuevo al mismo espacio.
Ambiente interior: síntesis de los valores diarios de variables físicas en un edificio, como temperatura, humedad relativa, movimiento de aire, calidad de aire, que afecta a la salud y/o al confort de los ocupantes
Apertura: hueco en la envolvente del edificio o en un local para la entrada de aire a su interior, por ejemplo puerta o ventana.
Área efectiva: combinación de las áreas de apertura en un edificio empleada en el cálculo de ventilación natural para aperturas en serie y en paralelo.

Atrio: espacio abierto en el interior de un edificio, usualmente cerrado o en ocasiones practicable, que permite la entrada de luz.
Barrera de viento: elemento diseñado para obstruir el viento y proteger contra una excesiva presión debida al viento.
Calidad de aire aceptable: aire en el que no hay contaminantes o en el que existen en determinadas concentraciones por debajo de los límites peligrosos para las personas.
Calor latente: calor intercambiado por una sustancia o sistema durante un cambio de estado, sin alteración de la temperatura del mismo.
Calor sensible: calor intercambiado por una sustancia o sistema durante un cambio de temperatura del mismo.
Captador de viento: dispositivo empleado en ventilación natural que aprovecha las sobrepresiones y depresiones debidas al viento que actúan sobre dicho elemento.
Caudal de ventilación: caudal de aire exterior que es intencionadamente suministrado a un espacio, zona o edificio.
Coeficiente de descarga: coeficiente adimensional que relaciona el flujo medio de aire a través del área de una apertura y la correspondiente diferencia de presión a través de dicha apertura.
Coeficiente de presión: coeficiente adimensional que relaciona la diferencia entre la presión estática y la presión ambiente en la superficie exterior de un edificio respecto a la presión dinámica calculada a la velocidad media del viento en un punto de referencia.
Colector de aire solar: colector solar que trasfiere la energía solar al aire, fluido caloportador, empleado para calefactar edificios mediante aire caliente o atemperado.
Concentración de contaminantes: concentración, en una porción de aire, de contaminantes indeseables o peligrosos tales como gases, partículas o compuestos volátiles.
Confort térmico: condición de satisfacción de los ocupantes de un edificio respecto al ambiente térmico interior.
Contaminante: constituyente indeseable del aire que reduce la calidad del aire y puede ser potencialmente peligroso para la salud de los ocupantes del edificio.
Convección forzada: transmisión de calor por movimiento inducido de un fluido.
Convección natural: transmisión de calor por movimiento causado por diferencia de densidades.
Corriente de aire: movimiento de aire excesivo en la zona ocupada por las personas que causa incomodidad térmica.
Chimenea solar: dispositivo pasivo que aprovecha la convección del aire calentado por energía solar para proporcionar ventilación natural a un edificio.
Difusión de aire por desplazamiento: desplazamiento del aire en el interior de un local por aire exterior o aire acondicionado sin mezcla apreciable entre ambos.
Distribución de presiones internas: variación de presiones estáticas en varios puntos del interior de un edificio debida a variaciones en la densidad del aire o flujo de aire entre el interior y el exterior del edificio.
Distribución de presiones superficiales: variación de presiones estáticas en varios puntos de la superficie exterior de un edificio causada por la acción del viento sobre el edificio.
Ecuación de flujo: ecuación que describe el flujo de aire a través de un edificio o componente en respuesta a una diferencia de presión.
Edad media del aire en el local: tiempo medio que cuesta al aire desplazarse desde la entrada a un punto determinado en el local.
Efecto chimenea: efecto que induce movimiento de aire entre dos puntos a distinta altura debido a una diferencia de densidades, causada por una diferencia de temperaturas interior-exterior.
Eficacia de ventilación: expresión que describe la habilidad de un sistema de ventilación natural o mecánica para eliminar los contaminantes de un espacio.
Envolvente del edificio: área total de las superficies de un edificio a través de las cuales se produce la transferencia de calor, iluminación, aire y humedad entre los espacios internos y al ambiente exterior.
Estanqueidad al aire: aplicado a un edificio indica las pérdidas de aire al exterior a través de huecos y aperturas del edificio al someterlo a una ligera presurización.
Estrategia de ventilación: plan mediante el cual se proporciona aire de ventilación a un espacio.
Estratificación del aire: formación de capas de diferentes densidades en un el aire sin mezcla, debido generalmente a una diferencia de temperaturas.
Exfiltraciones de aire: salida de aire de forma no controlada a través de grietas o pequeñas aperturas en un edificio debida a efectos de presión, viento o diferencia de densidades.
Fuente de contaminantes: objeto o persona en el interior de un edificio que produce una sustancia que contamina el ambiente interior, por ejemplo, bioefluentes humanos causados por las personas o compuestos volátiles de muebles o alfombras.
Flujo de aire: volumen de aire por unidad de tiempo que se mueve entre dos puntos, en kg/s ó en m^3/s.
Flujo laminar: flujo en el que el aire se mueve de forma que no se produce mezcla entre las capas de fluido.
Flujo turbulento: flujo de aire en el que las velocidades y presiones locales varían de forma irregular.
Grieta: pequeña apertura alrededor de puertas, ventanas y otras partes de la envolvente del edificio a través de las cuales puede pasar el aire.
Hueco de salida: hueco en la envolvente del edificio o en un local para la salida de aire al exterior.
Infiltración de aire: entrada de aire de forma no controlada a través de grietas o pequeñas aperturas en un edificio debida a efectos de presión, viento o diferencia de densidades.
Intensidad de turbulencia: es la relación entre la desviación estándar y la velocidad media del viento que sirve para caracterizar el viento.
Nivel de presión neutra: nivel o altura en el que la diferencia de presión del aire, debida a diferencia de densidades entre el interior y el exterior del edificio, es cero.





Ocupación: tiempo en el que las personas ocupan el edificio, generalmente expresado en horas.
Pleno o plenum: cámara a mayor/menor presión que el aire que lo rodea que recibe el aire antes/después de entrar/salir de un espacio.
Presión de aire: fuerza por unidad de área que ejerce el aire en una superficie, en Pa (1Pa equivale a 1 N/m^2).
Presión de estancamiento: presión debida del aire cuando permanece en reposo.
Presión debida al viento: aplicado a una fachada, diferencia de presión entre la presión exterior del edificio producida por el viento y la presión estática exterior en zonas alejadas del edificio.
Presión diferencial: diferencia de presión a través de la envolvente de un edificio o componente causada por medios naturales o artificiales.
Presión interna: presión existente en el interior de un edificio o espacio, normalmente expresada respecto a la presión exterior o atmosférica.
Red de flujo: una red o malla de zonas o nodos de presión diferente conectados por una serie de trayectorias de flujo.
Renovaciones de aire a la hora: número de veces que se renueva totalmente el aire de un edificio o de una zona del mismo.
Rugosidad del terreno: naturaleza del terreno sobre el que circula el aire, que provoca modificaciones en el perfil de la velocidad del viento.
Técnica de red. método teórico para estimar la magnitud del flujo de aire y el movimiento entre zonas usando un modelo que considera al edificio como un determinado número de espacios cada uno con su propia presión interna y unidos entre sí mediante trayectorias de flujo.
Temperatura ambiente: temperatura del aire dentro de una habitación o de una zona.
Temperatura exterior: temperatura del aire fuera de una habitación o zona.
Ventilación: proceso mediante el que se suministra o extrae aire a un espacio, por medios naturales o mecánicos.
Ventilación cruzada: flujo mediante el que se produce el movimiento de aire desde una cara del local o de la zona a la cara opuesta.
Ventilación mecánica o forzada: movimiento del aire en los locales de un edificio generado mediante medios mecánicos como ventiladores.
Ventilación mixta o híbrida: movimiento del aire en los locales de un edificio obtenido mediante el empleo de medios mecánicos y el aprovechamiento de fuerzas naturales como el viento y la diferencia de densidades del aire.
Ventilación natural: movimiento del aire a través de aperturas en un edificio, debido a presiones estáticas o dinámicas creadas por acción del viento o por diferencias de temperatura entre el interior y el exterior del edificio, o mediante una combinación de éstas actuando simultáneamente.
Ventilador: dispositivo mecánico que impulsa el aire mediante rotación de palas o álabes.
Zona sencilla: edificio o parte de un edificio que comprende una zona de presión uniforme.

Bibliografía

[1] Código Técnico de Edificación, *http://www.codigotecnico.org*
[2] H. Awbi, Ventilation of Buildings, ISBN 0-415-27056-1, Spon Press Taylor & Francis Group New York, 2003, p.307.
[3] *http://meteo.navarra.es/estaciones/mapadeestaciones.cfm*
[4] I. Troen, E.L. Petersen, European Wind Atlas, ISBN 87-550-1482-8. Risø National Laboratory, Roskilde, 1989, p.656.
[5] G. Baumbach, Control de la contaminación del aire, Springer Verlag, New York, 1991.
[6] BS 5925, Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation, 1991.
[7] Sherman, M.H. and Grimsrud, D. T., Lawrence Berkeley Laboratory, Ashrae Trasactions, 1980, 86(2) 778-807.
[8] Ashrae (2005), Fundamentals, Chapter 16, Ashrae.
[9] Liddament, M.W., AIVC, Guide to energy efficient ventilation, Conventry, ISBN 0 946075 85 9, 1996.
[10] Chia R. Chu, C.R., Chiu, Y., Chen, Y., Wang, Y., Chou, C. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation, Building and Environment, 2009, 44 (10), 2064-2072.
[11] Larsen T. S., Heiselberg, P., Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference, Energy and Buildings, 2008, 40 (6), 1031-1040.
[12] Caracoglia, L., Jones N. P., Analysis of full-scale wind and pressure measurements on a low-rise building, Journal of Wind Engineering an and Industrial Aerodynamics, 2009, 97 (5-6), 157-173.
[13] Huang, S. Li, Q.S., Xu S., Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD, Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63 (5), 612-627.
[14] Cóstola, D., Blocken, B., Hensen J.L.M., Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs, Building and Environment, 2009, (44) 10, 2027-2036.
[15] Holmes, J.D., Wind loads on low-rise buildings: the structural and environmental effects of wind on buildings and structures, Chapter 12, Faculty of Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 1986.
[16] Swami, M.V. S. Chandra, Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings, Final Report FSEC-CR-163-86, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, 1987.
[17] Liddament M. W., Air infiltration calculation techniques guide, AIVC, ISBN 0 946075 25 5, 1986.
[18] Grosso M., Wind pressure distribution around buildings: a parametrical mode. Energy and Buildings, 1992,18:101–31.
[19] Knoll B., Phaff J.C., de Gids W.F., Pressure simulation program, Proceedings of the conference on implementing the results of ventilation research, AIVC, 1995.
[20] Walker, I.S., Wilson, D.J., Evaluating models for superposition of wind and stack effect in air infiltration, Building and Environment, 1993, 28 (2), 201-210.
[21] M. Orme, N. Leksmono, Ventilation Modelling Data Guide. AIVC Guide 5, 2002.
[22] Sherman, M.H. and Grimsrud, D. T., Infiltration-pressurization correlation: simplified physical modeling. Ashrae Trans., 1980, 86(2), 778-807.
[23] Warren P. R.; Webb B. C., The relationship between tracer gas and pressurisation techniques in dwellings, Proc. 1st AIC Conf. on Air Infiltration Instrumentation and measuring techniques, 6-8 October 1980, Windsor, England.
[24] Sherman, M.H. and Grimsrud, D. T., Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data, Proc. 1st AIC Conf. On Air Infiltration Instrumentation and measuring techniques, 6-8 October 1980, Windsor, England.
[25] Liddament, M., Aida – An air infiltration development algorithm. Air Infiltration Rev., 1989, 11(1), 10-12.
[26] Dols, W. S., Walton, G. N., Denton, K. R., CONTAMW 1.0. User Manual, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 2000.
[27] Feustel, H. E., Smith B., COMIS 3.0 User Guide, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, USA, 1997.
[28] Feustel, H. E., COMIS - An international multizone air-flow and contaminant transport model, Energy and Buildings, 1999, 30(1), 3-18. *http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778898000437*



[29] Haas, A., Weber, A., Dorer, V., Keilholz, W., Pelletret, R., COMIS v3.1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modelling, Energy and Buildings, 2002, 34(9), 873-882. *http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778802000622*

[30] Klein, S.A., TRNSYS 16 - A Transient System Simulation Program, User Manual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, 2004.

[31] Weber, A., Koschenz, M., Dorer, V., Hiller, M., & Holst, S., Trnflow, a new tool for the modelling of heat, air and pollutant transport in buildings within Trnsys, Strategic Change, 1363-1368, 2003. *http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/IBPSA/UFSC84.pdf*

[32] Heiselberg, P. K., Murakami, S., Roulet C-A. Eds., Ventilation of large spaces in buildings - Part3: analysis and prediction techniques, Final Report of IEA-ECB CS, Annex 26, 1996.

[33] Patankar, S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science, Taylor & Francis, 1 edition, ISBN-13: 978-0891165224, England, 1980.

[34] Versteeg, H., W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition), Prentice Hall, ISBN-13: 978-0131274983, England, 2007.

[35] Van Hooff, T., Blocken B., Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: a case study for the Amsterdam Arena stadium, Environ Modell Softw, 25 (2010), pp. 51–65.

[36] Blocken, B., Van Hooff, T., Aanen, L., Bronsema, B., Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocking effect, Comput Fluids, 46 (2011), pp. 202–213.

[37] Chen, Q., Chapter 7: Design of natural ventilation with CFD, Sustainable Urban Housing in China, Edited by L.R. Glicksman and J. Lin, Springer, 2007.

[38] Ramponi, R. Blocken, B., CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters, Building and Environment, Volume 53, July 2012, Pages 34–48.

[39] Kato, S., Murakami, S., Mochida, A., Akabayashi, S., Tominaga Y., Velocity–pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation, Journal of Wind Engineering Ind. Aerodynamics, 44 (1992), pp. 2575–2586.

[40] Horan, J.M., Finn, D.P., Sensitivity of air change rates in a naturally ventilated atrium space subject to variations in external wind speed and direction, Energy and Buildings, 40 (2008), pp. 1577–1585.

[41] Jiang, Y., Chen, Q., Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation, Buildings and Environment, 37 (2002), pp. 379–386.

[42] Nikas, K.-S., Nikolopoulos, N., Nikolopoulos, A., Numerical study of a naturally cross-ventilated building. Energy and Buildings, 2010, 42 (4), pp. 422-434.

[43] T.S. Larsen., Natural ventilation driven by wind and temperature difference, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Group of Architectural Engineering, Aalborg University, 2005.

[44] Casey, M., Wintergerste, T., Best Practice Guidelines, ERCOFTAC Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD. ERCOFTAC, Brussels, 2000.

[45] Blocken, B. ,Gualtieri, C., Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics., Environmental Modelling and Software, Volume 33, July 2012, Pages 1-22.

[46] Ramponi R., Blocken, B., CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Available online 13 March 2012. *http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.005*

[47] Chia Ren Chu, Chiu Y.-H, Yu-Wen Wang, An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings, Energy and Buildings, Volume 42, Issue 5, May 2010, Pages 667–673. *http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.004*

[48] James O.P. Cheung, Chun-Ho Liu, CFD simulations of natural ventilation behaviour in high-rise buildings in regular and staggered arrangements at various spacings, Energy and Buildings 43 (2011) 1149–1158. *http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.024*

[49] Allard, F., ed. Natural Ventilation in Buildings, A Design Handbook, James & James *Science Publishers, London, 1998.

[50] CIBSE, Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings, A Guide for Designers, Developers and Owners, Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE: London, 1998.

[51] BRE, NatVent - CD-Rom, Building Research Establishment, 1999.

[52] Martin, A. and J. Fitzsimmons, Guidance Note GN 7/2000: Making Natural Ventilation Systems Work, BSRIA - The Building Services Research and Information Association: Bracknell, Bershire, UK, 2000.

[53] Irving, S. Uys, E., CIBSE Applications Manual: Natural Ventilation in Non-domestic Buildings, CIBSE: London, 1997.

[54] BRE, Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings, Building Research Establishement: Garston, Watford, UK, 1994.

[55] Wouters, P., Classification of Hybrid Ventilation Concepts. HybVent Forum '99, Sydney, Australia, 1999.

[56] Heiselberg, P., The Hybrid Ventilation Process - Theoretical and Experimental Work, Air Infiltration Review, 1999. Vol. 21(No. 1): p. 1-4.

[57] Axley, J. W., GCR-01-820 Application of Natural Ventilation for U.S. Commercial Buildings. Climate Suitability. Design Strategies & Methods Modeling Studies, Nist, 2001.

[58] Emmerich, S. J., Dols, W. S., Axley, J. W., NISTIR 6781 Natural Ventilation Review and Plan for Design and Analysis Tools, Nist 2001.

[59] Knoll, B. Kornaat, W., Controlled Natural Ventilation, 12th AIVC Conference - Air Movement & Ventilation Control Within Buildings, Ottawa, Canada: AIVC, 1991.

[60] Knoll, B., Phaff, J.C. Controlled Natural Ventilation for Commercial and Industrial Buildings, 19th AIVC Conference - Ventilation Technologies in Urban Areas, Oslo: AIVC, 1998.

[61] Axley, J.W., AIVC TechNote 54: Residential Passive Ventilation Systems: Evaluation and Design, Coventry, Great Britain, AIVC, 2000.

[62] Heiselberg, P., Principles of Hybrid Ventilation. IEA Annex 35 Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings, ISSN 1395-7953 R0207, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2002.

[63] Girault, P., B. Spennato, The Impact of Wind Turbulence on the Precision of a Numerical Modeling Study, Indoor Air 99, Edinburgh, ISIAQ & AIVC, 1999.

[64]. Saraiva, J.G., Marques da Silva, F., Atmospheric Turbulence Influence on Natural Ventilation Air Change Rates, Indoor Air, Edinburg, ISIAQ & AIVC, 1999.

[65]. Sirén, K. A., Modification of the Power-Law Equation to Account for Large-Scale Wind Turbulence, 18th AIVC Conference - Ventilation and Cooling, Athens, Greece, AIVC, 1997.

[66] Kurabuchi, T., Numerical Study of Airflow Structure of a Cross-ventilated Model Building, RoomVent 2000, Ventilation for Health and Sustainable Environment, University of Reading: Elsevier, 2000.

[67] Heiselberg, P., Svidt, K., Nielsen, P.V., Windows - Measurements of Air Flow Capacity, RoomVent 2000: Ventilation for Health and Sustainable Environment, University of Reading: Elsevier, 2000.

[68] Fürbinger, J.M., Comparison of the Accuracy of Detailed and Simple Models of Air Infiltration, 15th AIVC Conference - The Role of Ventilation, Buxton, Great Britain: AIVC, 1994.

[69]. Fürbringer, J.-M., Air Flow Simulation of the LESO Building Including a Comparison with Measurements and Sensitivity Analysis, Indoor Air '93: The 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 1993.

[70] Orme, M., Liddament M.W., Wilson, A., Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations, Coventry, Great Britain: AIVC, 1998.

[71] Thomas, R., ed. Environmental Design: An Introduction for Architects and Engineers, E & FN Spon: London, Second Edition, 1999.

[72] Martin, A.J., Technical Note TN 11/95: Control of Natural Ventilation, BSRIA - The Building Services Research and Information Association: Bracknell, Bershire, UK, 1996.

[73] Windcatchers: A cost effective solution for Walworth academy sports hall, *http://www.ascinfo.co.uk* [access 14.08.11], 2011.

[74] Hughes BR, Ghani S.A., A numerical investigation into the feasibility of a passive-assisted natural ventilation stack device, Int J Sustain Energy 2010(30), 193–211.

[75] Khan, N., Su, Y., Riffat S. B., A review on wind driven ventilation techniques, Energy and Buildings, 2008(40) 8, 1586-1604.
[76] Allard, F., Natural ventilation studies within the EC PASCOOL Joule II Project, Air Infiltration Review, Vol. 17(4), 1996.
[77] Etheridge, D., Sandberg, M. Building Ventilation: Theory & Measurement, Chichester: John Wiley & Sons, 1996.
[78] Li, Y., Prediction of natural ventilation in buildings with large openings, Building and Environment, 2000, Vol. 35, p. 191-206.
[79] Eftekhari, M. M., Predicting air flow distribution in a naturally ventilated room, RoomVent 2000 - 7th International Conference on Air Distribution in Rooms, University of Reading, UK: Elsevier, 2000.
[80] Gan, G., Numerical determination of the effective depth for single-sided natural ventilation, Indoor Air 99, Edinburgh: ISIAQ & AIVC, 1999.
[81] Fracastoro, G.V., Mutani, G., Perino, M., Numerical simulation of transient effects of window openings, RoomVent 2000: Ventilation for Health and Sustainable Environment, University of Reading: Elsevier, 2000.
[82] Murakami, S., Kato, S., Akabayashi, S., Visualization with laser light sheet applied to internal and external air flows in building environmental engineering, Fluid Control and Measurement, M. Harada, Editor, Pergamon Press: Oxford, p. 731-738, 1986.
[83] Gunnarsen, L., Replacing Mechanical Ventilation with Natural Ventilation and Increased User Control - An Intervention Study in a School, Healthy Building 2000, Espoo, Finland: SIT Indoor Air Information Oy, Helsinki, Finland, 2000.
[84] *http://www.flickr.com/photos/stevecadman/*
[85] New practice case study 102, The Queens Building De Montfort University - feedback for designers and clients, BRE, Garston, Watford, 1997.
[86] *http://www.feildenclegg.com*
[87] *http://projects.bre.co.uk/envbuild/*
[88] The Royal Academy of Engineering, Engineering a low carbon built environment. The discipline of Building Engineering Physics, ISBN: 1-903496-51-9, The Royal Academy of Engineering, London, 2010.
[89] Awbi, H. B., Gan, G., Simulation of solar-induced ventilation, Proc. 2nd World Renewable Congress, 4, 2016-30, 1992.
[90] Awbi, H. B., Design consideration for naturally ventilated buildings, Renewable Energy, 1994 (5), 1081-1090.
[91] Belgian Building Research Institute (BBRI), Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active facades, Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, BBRI, Belgium, 2002. *http://www.bbri.be/activefacades/*
[92] Belgian Building Research Institute (BBRI), Ventilated double facades. List of buildings equipped with ventilated double facades, Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, BBRI, Belgium, 2004. *http://www.bbri.be/activefacades/*
[93] Aschehoug, Ø, Perino, M. Expert Guide. Part 2 Responsive Building Elements, IEA ECBCS Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings, November 2009. *http://www.civil.aau.dk/Annex44*
[94] Torcellini, P., Pless, S., Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences, World Renewable Energy Congress VIII and Expo, Denver, Colorado, August 29–September 3, 2004. NREL/CP-550-36277.
[95] Paez Ortega, E., Analyzes of Solar Chimney Design, Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, July 2011.
[96] Khedari, J., Hirunlabh, J., Bunnag, T., Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses, Energy and Buildings, 26 (1997), 159-164.
[97] Khanal, R. , Lei, C., Solar chimney - A passive strategy for natural ventilation, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 8, August 2011, Pages 1811–1819. *http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.035*
[98] Zhai, X.Q., Dai, Y.J., Wang, R.Z., Comparison of heating and natural ventilation in a solar house induced by two roof solar collectors, Applied Thermal Engineering, Volume 25, Issues 5–6, April 2005, Pages 741–757. *http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.08.001*
[99] Hirunlabh, J., Wachirapuwadon, S., Pratinthong, N., Khedari, J., New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation, Building and Environment, Volume 36, Issue 3, 1 April 2001, Pages 383–391. http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00016-0
[100] Kleiven, T., Natural Ventilation in Buildings – Architectural concepts, consequences and possibilities. Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim. Ph.D. thesis 13, Department of Architectural Design, History and Technology, ISBN 82-471-5560-5, 2003.
[101] Ghiaus, C., Allard, F., Natural ventilation in the urban environment. Assesment and design, Buildings, Energy and Solar Technology, Earthscan, UK, 2005. ISBN 1-84407-129-4.
[102] Kolokotroni, M., Kukadia, V., Perera, E., European Project on overcoming technical barriers to low-energy natural ventilation, Proceedings of the CIBSE/ASHRAE Joint National Conference, Harrogate, UK, September 1996, Vol. 1, pp. 36-41.
[103] Gids, W.F., NatVent - Overcoming technical barriers to low-energy natural ventilation in office type buildings in moderate and cold climates, EC CONTRACT: JOR3-CT95-0022 (DGXII) Barriers to Natural Ventilation Design of Office Buildings TNO Building and Construction Research July 1998. *http://projects.bre.co.uk/natvent/reports/barrier/nlbar.pdf*
[104] Seppänen, O., Fisk, W. J., Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers, Indoor Air, 2002, 12 (12), 98-112.
[105] Cardinalea N., Micuccia, M., Ruggierob, F., Analysis of energy saving using natural ventilation in a traditional Italian building, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 2, February 2003, Pages 153–159 *http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00024-5*

Herramientas de análisis climático y estrategias de proyecto

Climate Analysis Tools and Design Strategies

Olatz Irulegi [a*], Antonio Serra [b]

[a]*Dra. Arquitecto y* [b]*Dr. Ingeniero Ambiental. Departamento de Arquitectura. E.T.S. de Arquitectura de San Sebastián. Universidad del País Vasco*

Resumen

Uno de los retos más importantes al que se enfrenta el sector de la construcción es conseguir edificios con un consumo de energía muy reducido, casi nulo. Para ello, es importante contar con herramientas adecuadas, sobre todo en las fases iniciales de proyecto, que faciliten la toma de decisiones. Sin una correcta interpretación de los condicionantes climáticos, geográficos y de emplazamiento, será muy difícil alcanzar los objetivos establecidos. Los climogramas son herramientas para el análisis del confort higrotérmico e interpretación climática con las que establecer estrategias de diseño bioclimático en los edificios. Partiendo de determinados parámetros climáticos característicos de una localidad (temperatura, humedad, radiación solar, etc.), gracias a estas cartas bioclimáticas es posible determinar las estrategias pasivas más adecuadas y sencillas de implementar para conseguir edificios energéticamente más consecuentes garantizando las condiciones de confort. En este capítulo se muestra el manejo de los climogramas a través de la aplicación informática CLIMATE CONSULTANT. Además, se recogen diferentes teorías relacionadas con el análisis del confort higrotérmico facilitando la interpretación de los diagramas. Finalmente, se muestran ejemplos de climogramas de diferentes ciudades: Madrid, Sevilla, San Sebastián, Oslo y Caracas.

Palabras clave: Climogramas, Análisis Climático, Estrategias Bioclimáticas, Técnicas Pasivas, Software, Confort

Abstract

The construction sector is facing an important goal: obtaining buildings with a low energy consumption, nearly zero. For this purpose it is necessary to use adequate tools, especially in early design stages, that facilitate the decision making. Without a correct interpretation of climatic, geographic and location parameters in a project, meeting the established requirements would be difficult. The climograms are tools for the analysis of hygrothermal comfort and climatic interpretation to determine bioclimatic design strategies in buildings. According to specific climatic parameters of a location (temperature, humidity, solar radiation, etc.), it is possible to define the most appropriate passive techniques (shading needs, thermal mass, night ventilation, etc) in order to obtain energetically more consequent buildings. This chapter shows the use of the climograms (referring to an informatics application CLIMATE CONSULTANT). Moreover, different theories related to the analysis of hygrothermal comfort are collected to facilitate the interpretation of the diagrams. Finally, bioclimatic strategies for five different cities are illustrated: Madrid, Seville, San Sebastian, Oslo and Caracas.

Keyword: Climograms, Climatic Analysis, Bioclimatic Strategies, Passive Techniques, Software, Comfort

1. Introducción

Uno de los retos más importantes al que se enfrenta el sector de la construcción es conseguir edificios con un consumo de energía muy reducido, casi nulo. Para ello, es importante contar con herramientas adecuadas, sobre todo en las fases iniciales de proyecto (tanto en rehabilitación como en nueva planta), que faciliten la toma de decisiones. Sin una correcta interpretación de los condicionantes climáticos, geográficos y de emplazamiento, será muy difícil alcanzar los objetivos establecidos.

Con los programas de simulación energética (como EnergyPlus, ESPr, TRNSYS, etc.) se obtienen las demandas energéticas de los edificios (calefacción, refrigeración, iluminación artificial, etc.). Son instrumentos con los que es posible predecir el comportamiento de un edificio antes de que este sea construido, es decir, podemos comprobar que el edificio diseñado cumple con el objetivo de consumo casi nulo requerido. El manejo de estos

* o.irulegi@ehu.es

Citar como: Irulegi, O., Serra, A. (2012). Herramientas de análisis climático y estrategias de proyecto. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.) *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 97 – 128). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

programas requiere formación específica, la modelización de los edificios no es una tarea inmediata y la modificación de los parámetros introducidos (sobre todo, los relacionados con la geometría) es una labor de cierta complejidad. Por lo tanto, para poder hacer un uso adecuado de estos softwares informáticos, es preciso que el diseño del edificio esté ya muy definido, es decir, el nivel de incertidumbre debe ser el mínimo. Estos programas se utilizan normalmente en la fase final de proyecto, es decir, cuando las decisiones más relevantes relacionadas con el diseño (que además son factores influyentes en el comportamiento energético del edificio) ya están tomadas.

El objetivo principal de este capítulo es incidir en la importancia de definir estrategias de diseño pasivo, acordes a los condicionantes climáticos exteriores, con las que conseguir las máximas condiciones de confort en el interior de los edificios minimizando, de este modo, las exigencias energéticas derivadas de un diseño no apropiado. El capítulo comienza mostrando la clasificación climática de Köppen, con la que se caracterizan los distintos tipos de clima a nivel mundial. Esta primera aproximación es fundamental, sobre todo, para identificar (de manera general) la particularidad de la región geográfica en la que se sitúa el proyecto. Por ejemplo, el clima característico de Madrid es de estepa fría, muy diferente al clima tropical tipo sabana de Caracas. Es evidente, por lo tanto, que un edificio (para un mismo uso y programa) situado en Madrid o Caracas deberá contar con características arquitectónicas diferentes y adecuadas a los condicionantes climáticos de su entorno.

Las estrategias constructivas (para conseguir edificios de consumo energético casi nulo) que se planteen en un edificio deberán estar dirigidas a conseguir condiciones de confort (en el interior del edificio) durante el máximo número de horas posible. De esta manera, se minimiza el uso de sistemas activos (climatización, iluminación artificial, etc.) y por tanto, el uso de energía. La definición del confort es otro de los temas fundamentales que se tratará en este capítulo. Las herramientas para evaluar el confort higrotérmico están basadas en principios teóricos y métodos de medición de la sensación térmica percibida por las personas. Estos principios y métodos han sido recibidos por normas y estándares y se utilizan en el diseño y proyecto de las envolventes de los edificios y de los sistemas de climatización en cuanto permiten evaluar y averiguar la sensación higrotérmica percibida por el ser humano por efecto de las acciones simultaneas del clima exterior, la envolvente arquitectónica, el sistema de climatización y el comportamiento individual.

Los climogramas (o cartas bioclimáticas) son herramientas de interpretación bioclimática de fácil manejo y gran utilidad para establecer estrategias de diseño pasivo garantizando las condiciones de confort, sobre todo orientado a las fases iniciales de proyecto. Partiendo de determinados parámetros climáticos característicos de una localidad (temperatura, humedad, radiación solar, etc.), gracias a estos climogramas es posible determinar las estrategias pasivas más adecuadas (necesidad de sombreamiento, inercia térmica, ventilación nocturna, etc.) para la obtención de edificios energéticamente más consecuentes. En este capítulo se muestra el manejo de los climogramas a través de una aplicación informática gratuita elaborada por el grupo de herramientas de diseño energético de la Universidad de California (UCLA Energy Design Tools Group). Para finalizar, se recogen a modo de ejemplo, el análisis bioclimático de cinco ciudades distintas (Madrid, San Sebastián, Sevilla, Oslo y Caracas), en las que se establecen estrategias pasivas a partir de sus climogramas específicos.

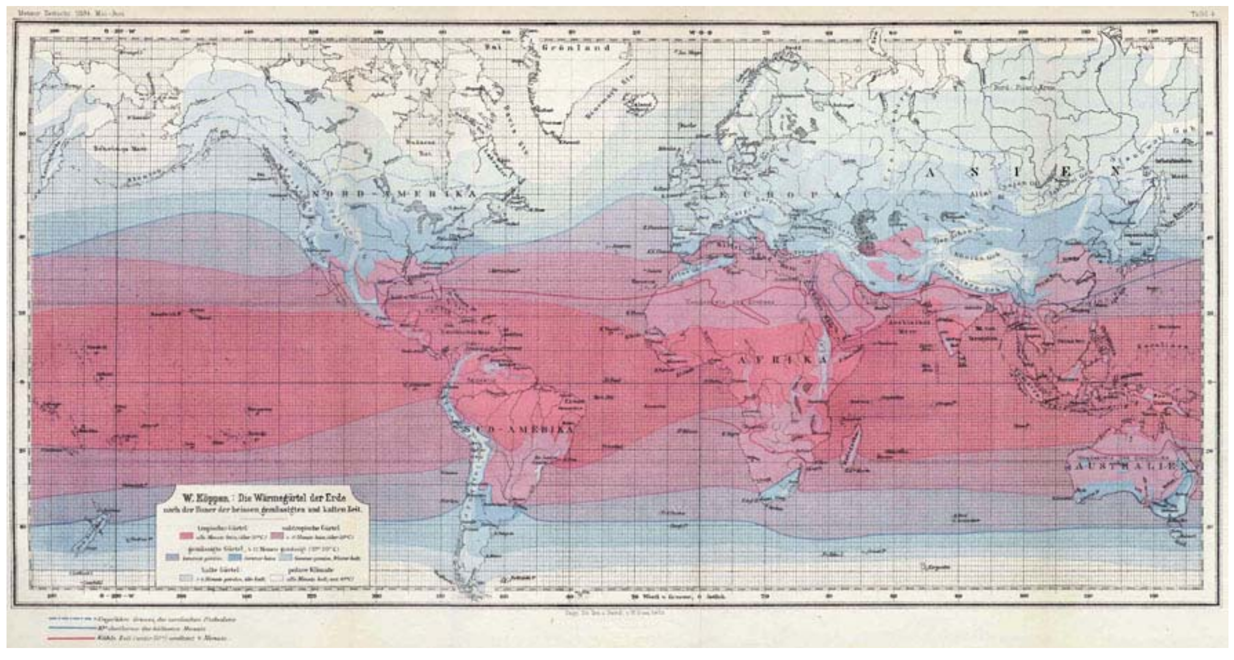


Fig. 1. Mapa de Köppen, 1884.

2. Clasificación climática

El término clima (del griego: κλίμα) se define como el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región. El concepto de clasificación climática se aplica a numerosas disciplinas además de a la investigación contra el cambio climático en la que se enmarca este capítulo, entre ellas están la geografía física, la hidrología, la agricultura, la biología, los aspectos educacionales, etc.

La comprensión y correcta interpretación de las particularidades climáticas de un entorno geográfico es una de las piezas fundamentales de la arquitectura bioclimática. Por esta razón, este apartado comienza con la clasificación climática de Köppen-Geiger, por su relevancia y difusión a nivel mundial, y sigue con la recogida en el Código Técnico de la Edificación - CTE (normativa vigente en España), por su carácter local.

2.1. Clasificación climática de Köppen-Geiger

Históricamente, los griegos fueron los primeros en desarrollar zonificaciones climáticas a nivel mundial. La definición de clima tropical, clima templado y polar fue realizada a primeros del siglo XIX y no fue hasta 1884 cuando W. Köppen (Fig.1) [1], presentase su tan difundida y referenciada clasificación climática en la que se identificaron cinco tipos diferentes.

El primer mapa en el que se ilustran los diferentes climas, fue publicado en 1900 y su última versión fue realizada en 1961 por R. Geiger. Recientemente, a partir de los datos registrados por la Climatic Research Unit (CRU) de la Universidad de East Anglia y el Centro Climatológico de Precipitaciones Mundial (GPCC) del Servicio de Metrología de Alemania, en 2006 F. Rubel y M- Kottek (Fig.2) [2] presentaron una nueva versión actualizada y digitalizada del mapa Köppen-Geiger válida para la segunda mitad del siglo XX.

Además, han desarrollado una aplicación para Google Earth, con lo que se facilita aún más su uso: indicando las coordenadas geográficas es posible identificar con facilidad la zona climática a la que pertenece.

Los mapas de Köppen-Geiger se pueden consultar en la página web: *http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at.*

Por lo tanto, identificar las características climáticas generales de un emplazamiento concreto debería ser uno de los puntos de partida con el que empezar un proyecto arquitectónico.

Además, F. Rubel y M- Kottek han estudiado escenarios futuros en los que se puede ver reflejada la influencia del calentamiento global en la caracterización climática de los diferentes territorios. La nomenclatura utilizada para la clasificación climática en esta última versión se compone de tres letras y se muestra en la Tabla 1.

Fig. 2. Mapa actualizado de Köppen-Geiger, 2006..

Tabla 1
Nomenclatura pata la clasificación climática

Tipo de clima	*Precipitación*	*Temperatura*
A: ecuatorial	W: desierto	h: caluroso y seco
B: seco	S: estepa	k: frío y seco
C: templado	f: húmedo	a: verano cálido
D: nevado	s: verano seco	b: verano templado
E: polar	w: invierno seco	c: verano fresco
	m: monzón	d: extremadamente continental
		F: frío polar
		T: polar tundra

2.2. Clasificación climática de Köppen-Geiger para España

En España están representados los siguientes tipos de clima según Köppen-Geiger (Fig. 3) [3]:

2.2.1. Clima seco, con subtipos:

- Desierto, en áreas de Almería y Murcia, la práctica totalidad de Lanzarote y Fuerteventura y la zona costera sur de las islas de Gran Canaria y de Tenerife.
- Estepa calurosa, en el sureste de la Península y Andalucía.
- Estepa fría, en La Mancha, Extremadura, y zona central de la cuenca del Ebro.

2.2.2. Clima templado cálido, con subtipos:

- Clima templado cálido con verano seco, que es el clima mediterráneo.
- Clima templado cálido sin estación seca, en Galicia, gran parte de la meseta norte, Sistema Central, y Sistema Ibérico.

2.2.3. Clima templado frío: en nuestro país este clima se registra únicamente en zonas de alta montaña.

2.3. Clasificación climática según el Código Técnico de la Edificación - CTE

Con el objetivo de limitar la demanda energética de los edificios, desde las distintas directivas europeas se especifica la importancia de considerar las peculiaridades climáticas de cada territorio y es competencia de cada país establecer el procedimiento y las exigencias específicas que deben cumplir sus edificios.

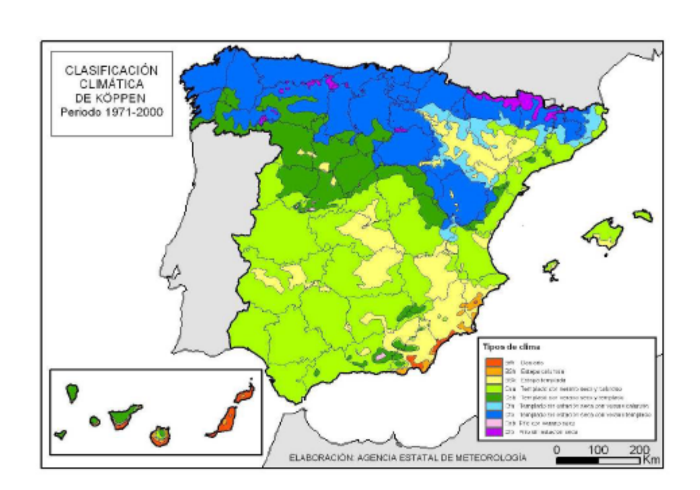


Fig. 3. Clasificación climática de Köppen. (1971-2000).
Fuente: AEMET.

En el caso de España, la determinación de las zonas climáticas en el CTE se realiza a partir del cálculo de las severidades climáticas de invierno y de verano para localidades que disponen de registros climáticos contrastados.

Una vez obtenidas las dos severidades climáticas, la zona climática se determina localizando los dos intervalos correspondientes en los que se encuentran dichas severidades, de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2
Zonas climáticas. Fuente: Código Técnico de la Edificación

<table>
<tr><td rowspan="4">SC (verano)</td><td>A4</td><td>B4</td><td>C4</td><td></td><td rowspan="4">E1</td></tr>
<tr><td rowspan="3">A3</td><td rowspan="3">B3</td><td>C3</td><td>D3</td></tr>
<tr><td>C2</td><td>D2</td></tr>
<tr><td>C1</td><td>D1</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">SC (invierno)</td></tr>
</table>

La severidad climática combina los grados-día y la radiación solar de la localidad, de forma que se puede demostrar que cuando dos localidades tienen la misma severidad climática de invierno (SCI), la demanda energética de calefacción de un mismo edificio situado en ambas localidades es sensiblemente igual. Lo mismo es aplicable para la severidad climática de verano (SCV). Para invierno se definen cinco divisiones distintas correspondientes a los siguientes intervalos de valores:

Tabla 3
Severidad climática de invierno. Fuente: Código Técnico de la Edificación

A	*B*	*C*	*D*	*E*
SCI<0,3	0,3<SCI<0,6	0,6<SCI<0,95	0,95<SCI<1,3	SCI>1,3

Para verano se definen 4 divisiones distintas correspondientes a los siguientes intervalos de valores:

Tabla 4
Severidad climática de verano. Fuente: Código Técnico de la Edificación

1	2	3	4
SCV<0,6	0,6<SCV<0,9	0,9<SCV<1,25	SCV>1,25

Considerando la gran diversidad climática, el CTE establece requisitos diferentes para los edificios situados en cada zona. Por ejemplo, en la zona climática más fría, zona E1, el valor de transmitancia térmica (U) permitido para los cerramientos es de 0,57 W/m^2K mientras que en la zona climática más cálida, zona A4, es de 0,94 W/m^2K.

Por otro lado, el valor U para las ventanas es más bajo en climas más fríos y en fachadas con una mayor superficie acristalada. Por ejemplo: en la zona E1, en una fachada orientada al norte y un 55% de acristalamiento, el máximo valor U permitido es de 1,9 W/m^2K, mientras que en la zona A4, en una fachada con orientación sur y un 20% de acristalamiento es de 5,7 W/m^2K.

3. El confort higrotérmico

3.1. El ambiente higrotérmico

Los factores que determinan el ambiente higrotérmico en un espacio cerrado son principalmente:

- las características térmicas de los elementos de contorno (envolvente del edificio),
- las fuentes interiores de calor y de vapor,
- el clima exterior,
- las características del sistema de climatización.

Las herramientas para evaluar el confort higrotérmico están basadas en principios teóricos y métodos de medición de la sensación térmica percibida por las personas resumidas en las siguientes normas:

- UNE EN 27243:95. Ambientes calurosos: estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo (basado en el índice WBGT).
- UNE EN ISO 7726:02. Ergonomía de los ambientes térmicos: instrumentos de medida de las magnitudes físicas.
- UNE EN ISO 7933:05. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga estimada.
- UNE EN ISO 8996:05. Ergonomía del ambiente térmico: determinación de la tasa metabólica.
- UNE EN ISO 15265:05. Ergonomía del ambiente térmico. Estrategia de evaluación del riesgo para la prevención del estrés o incomodidad en condiciones de trabajo térmicas.
- UNE EN ISO 7730:06. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) y los criterios de bienestar térmico local.

Se trata de normas promulgadas por la ISO - International Standard Organization y adoptadas por el CEN - Comité Europeo de Normalización. Estas normas se utilizan en el diseño y proyecto de las envolventes de los edificios y de los sistemas de climatización en cuanto permiten evaluar y averiguar la sensación higrotérmica percibida por el ser humano por efecto de las acciones simultaneas del clima exterior, la envolvente arquitectónica, el sistema de climatización y del comportamiento individual.

3.2. Metabolismo y control de la temperatura

Todos los órganos periféricos del cuerpo humano envían señales al cerebro a través del sistema nervioso, estas señales permiten la percepción de sensaciones tales como las visuales, el sonido, el tacto, las propiedades olfativas y térmicas. Estos órganos periféricos son parte del sistema de termorregulación, que lleva a cabo las acciones fisiológicas necesarias para lograr el equilibrio entre los flujos de energía térmica y mecánica producidos por los procesos bioquímicos dentro del cuerpo llamados metabolismo, y la suma algebraica de los flujos de calor y trabajo que son constantemente intercambiados entre el cuerpo y el medio ambiente, con una intensidad que depende de la actividad. Si este equilibrio se alcanza, no hay variación de energía interna del sistema (cuerpo humano), es decir, que la temperatura promedio interna se mantiene constante.

El término metabolismo indica el conjunto de procesos que en el interior del cuerpo humano transforman la energía química potencial suministrada por los alimentos en otras formas de energía. Los procesos metabólicos en su conjunto son exotérmicos, son principalmente procesos oxidativos que transforman en trabajo mecánico (muscular) y en calor la mayoría de la energía potencial química contenida en los alimentos y, posiblemente, en las sustancias de reserva acumuladas. El flujo total de energía generada dentro del cuerpo se llama potencia producida por el metabolismo o flujo metabólico, comúnmente se indica con el símbolo M y se mide en Vatios o en Met: 1 Met es equivalente a 58 W/m^2 de superficie corporal, y es el flujo metabólico conectado a la posición sentada en condiciones relajadas.

Una de las condiciones vitales para el ser humano es la capacidad de mantener la temperatura constante de su cuerpo y, más específicamente la temperatura de la zona más interna del cuerpo, llamado núcleo, que incluye los órganos vitales. Esta temperatura debe mantenerse alrededor de 37°C aproximadamente con variaciones de no más de aproximadamente 0,5°C durante todo el día. Las condiciones que garantizan la constancia de la temperatura interna son, desde el punto de vista termodinámico, aquellas que corresponden a una variación nula de la energía interna del cuerpo. Un cambio positivo en la energía interna genera un aumento de la temperatura corporal, mientras que un cambio negativo provoca una

disminución de la misma. En ambos casos interviene el sistema de termorregulación que actúa de diversas maneras, con el fin de eliminar el desequilibrio.

Los mecanismos de termorregulación que permiten al ser humano mantener una temperatura interna constante pueden ser:

- De tipo natural o involuntarios:
  - actividad fisiológica vasomotora,
  - actividad conductual: sudoración o escalofríos,

- De tipo artificial o voluntarios:
  - prendas de vestir,
  - el cambio de las condiciones ambientales: uso de instalaciones.

Es con la acción de los mecanismos termorreguladores cuando percibimos las sensaciones de calor o de frío. En particular, las investigaciones demuestran que:

- La activación del mecanismo vasomotor, incluso en presencia de una ligera sudoración, no compromete la sensación de confort,
- Cuando el cuerpo humano debe activar los mecanismos naturales de termorregulación como sudoración visible o escalofríos, la sensación percibida por el ser humano es decididamente desagradable (de malestar, discomfort).

3.3. La evaluación del bienestar higrotérmico

Las sensaciones térmicas dependen de las acciones del sistema termorregulador, que actúa para lograr la igualdad entre la energía térmica y mecánica producida por los procesos bioquímicos en el interior del cuerpo y el intercambio de calor y de trabajo entre el cuerpo y el exterior. Este concepto permite identificar las variables que afectan a las sensaciones térmicas, ya que coinciden con las que determinan los procesos de intercambio de calor y masa entre el cuerpo humano y el medio ambiente.

La primera ley de la termodinámica aplicada al sistema del cuerpo humano, sin considerar las variaciones de energía cinética, potencial, etc. se puede escribir de acuerdo con la relación siguiente:

[E1] $$M - W - Q = dU/d\tau$$

Q y W son positivos cuando el calor se pierde y el trabajo es realizado por el cuerpo humano. El intercambio de calor sensible y latente entre el hombre y el medio ambiente se producen en la superficie exterior del cuerpo humano y dentro de la cavidad pulmonar.

Desarrollando todos los términos de la ecuación:

[E2] $$M - W - Q_c - Q_r - Q_k - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl} = dU/d\tau$$

Donde:

- M: potencia generada por la actividad metabólica [W],
- W: potencia mecánica intercambiada entre el ser humano y el ambiente [W],
- Q_c: potencia térmica sensible intercambiada por convección [W],
- Q_r: potencia térmica sensible intercambiada por radiación [W],
- Q_k: potencia térmica sensible intercambiada por conducción [W],
- Q_{trp}: potencia térmica latente intercambiada por transpiración (difusión de vapor) a través de la piel [W],
- Q_{sdz}: potencia térmica latente intercambiada por evaporación del sudor en la superficie de la piel [W],
- Q_{rps}: potencia térmica sensible intercambiada por respiración [W],
- Q_{rpl}: potencia térmica latente intercambiada por respiración [W],
- $dU/d\tau$: variación de la energía interna del cuerpo humano en la unidad de tiempo [W].

La ecuación [E2] se puede escribir:

[E3] $$M - W = M\,(1-\eta)$$

Donde el símbolo $\eta=W/M$ representa la eficiencia de conversión de la energía metabólica en trabajo. En régimen estacionario $dU/d\tau = 0$.

Estudiando en detalle la ecuación [E2] se deduce que la sensación térmica depende de algunas propiedades de los materiales usados y de ocho cantidades físicas:

- T_a: diferencia de temperatura entre piel y aire,
- φ_a: diferencia entre el título de vapor sobre la piel y en la cavidad pulmonar y el título de vapor del aire,
- ω_a: velocidad del aire,
- T_{rm}: temperatura radiante media = diferencia de temperatura entre la piel o la ropa y la temperatura de las superficies de la habitación,
- Q_{ev}: calor latente transportado por el agua que se evapora de la piel del sujeto (sudor) y las cavidades de los pulmones (respiración),
- T_{sk}: temperatura de la piel,
- R_v: resistencia térmica de la ropa,
- $H = M\,(1-\eta)$. M es la energía generada en el interior del cuerpo humano mediante los procesos de transformación de la energía química de los alimentos.

Hay que considerar que:

- T_a, φ_a, ω_a, T_{rm}, están en relación con el ambiente físico (aire + envolvente),
- T_{sk}, Q_{ev} están relacionadas con la fisiología del cuerpo humano,

- R_v, H están relacionadas con el comportamiento del sujeto humano.

Los estudios experimentales llevados a cabo en los años 60 por el profesor Povl Ole Fanger (1934 - 2006) en la Technical University of Denmark - Universidad Técnica de Dinamarca han demostrado que, en el estado de confort térmico las variables T_{sk} y Q_{ev} están fuertemente relacionadas con el metabolismo [4] [5] [6] [7].

El profesor Fanger realizó una serie de pruebas sobre una muestra estadísticamente significativa de la población. Operando en una cámara climática recogió experimentalmente la opinión de la gente acerca del bienestar que percibían y, al mismo tiempo, los datos físicos y fisiológicos que caracterizaban cada prueba. Analizando los resultados obtenidos en muchas pruebas Fanger determinó que en el estado de confort térmico, T_{sk} y Q_{sdz} están estrechamente relacionadas con el metabolismo específico (por unidad de superficie de cuerpo) M/A_p y con la eficiencia mecánica, mientras que la variación de otras causas que contribuyen al equilibrio térmico del cuerpo no causan efectos apreciables sobre el confort.

Las ecuaciones que resumen los datos experimentales de Fanger son:

[E4] $$Q_{ev}^* = 0{,}42A_p \cdot [M(1-\eta)/A_p - 58{,}15]$$

[E5] $$t_{sk}^* = 35{,}7 - 0{,}0275 \cdot M \cdot (1-\eta)/A_p$$

- el asterisco (*) indica que los valores de las variables están relacionados con las condiciones de bienestar.

Consecuentemente, Povl Ole Fanger demostró que las variables físicas de las cuales depende el confort térmico son seis:

t_a, φ_a, ω_a, t_{rm}, R_v, M/A_p.

El estado neutro de confort térmico se identifica por las infinitas combinaciones de las seis variables físicas que satisfacen las dos ecuaciones que representan las relaciones entre estas variables.

Manteniendo constantes M/A_p, R_v y φ_a, las ecuaciones están satisfechas con los conjuntos de tres valores de t_a, t_{rm}, ω_a, pertenecientes a las curvas llamadas líneas de isoconfort (Fig.4) que establecen, por una velocidad del aire fijo, todos los pares de temperaturas t_a y t_{mr} que se traducen en una sensación de confort o neutralidad térmica (PMV=0, según Fanger).

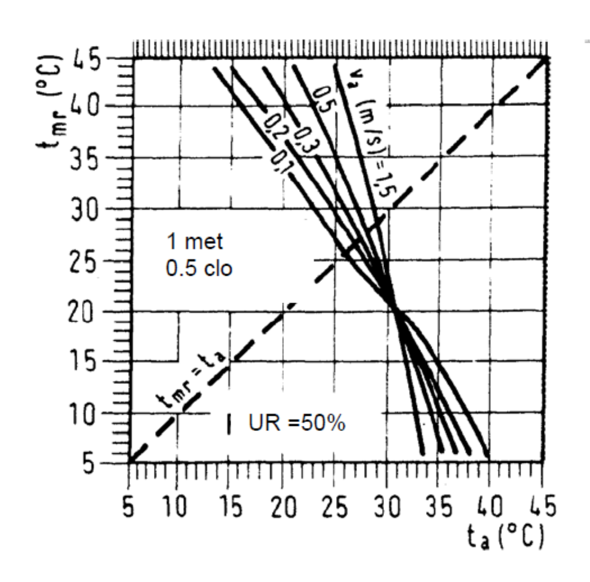
Cada curva $t_{rm} = f(t_a)$ se puede aproximar a una línea recta: se obtiene de esta manera la ecuación [E6], que define una temperatura particular que, si es atribuida al aire, provoca un intercambio de calor, y por lo tanto, una sensación, equivalente al total debido a los intercambios por convección y radiación.

[E6] $$t_o = a \cdot t_a + (1-a) \cdot t_{rm}$$

Donde a es función de la velocidad del aire y t_o es la temperatura operativa, un indicador parcial de confort térmico. En estas curvas se consideran fijos los otros valores que interfieren en la sensación:

- $\varphi_a = 50\%$,
- $R_v = 1$ clo,
- $M/A_p = 1$ met,

- a = 0,5 si $0{,}0 < \omega a < 0{,}2$ m/s
- a = 0,6 si $0{,}2 < \omega a < 0{,}6$ m/s
- a = 0,7 si $0{,}6 < \omega a < 1{,}0$ m/s



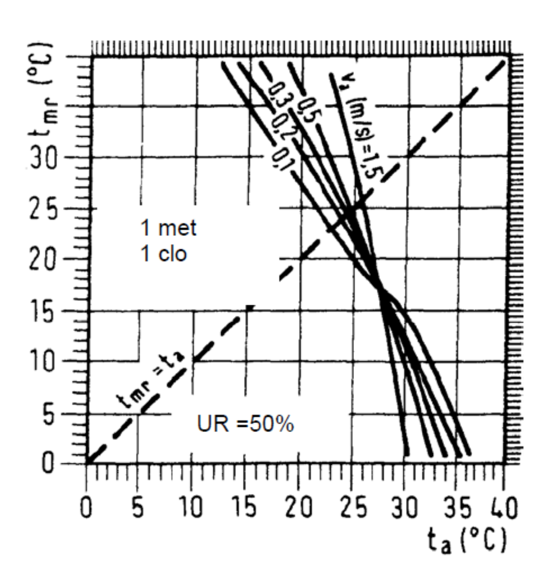


Fig.4. Curva de isoconfort.

La temperatura operativa se puede definir como la temperatura uniforme del aire y de las paredes del ambiente que causaría en el sujeto el intercambio de calor por convección y radiación que se produciría en un entorno real:

[E7] $t_o = (h_r \cdot t_{rm} + h_c \cdot t_a) / \alpha$

Donde:

- t_{rm} = temperatura radiante media,
- t_a = temperatura del aire,
- h_c = coeficiente de transferencia térmica por convección,
- h_r = coeficiente de transferencia de calor por radiación,
- $\alpha = h_c + h_r$ = coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación sobre la superficie del cuerpo.

En la práctica, si la diferencia entre la temperatura radiante media y la temperatura del aire es inferior a 4°C, y la velocidad del aire es inferior a 0,2 m/s, se puede considerar t_o igual a la media aritmética de t_{rm} y t_a:

[E8] $t_o = (t_{rm} + t_a) / 2$

3.4. El índice de bienestar térmico PMV

Los datos experimentales recogidos por Fanger se refieren a los valores de cuatro variables físicas medidas en la cámara de prueba: t_a, t_{rm}, ω_a, φ_a y a los juicios verbales (votos) seleccionados entre una escala nominal que se compone por siete valores: muy frío (-3), frío (-2), ligeramente frío (-1), neutro (0), ligeramente caliente (+1), caliente (2), muy caliente (3).

Con estos datos se ha podido demostrar que las sensaciones diferentes a la sensación neutra (PMV = 0), es decir, aquellas que corresponden a las percepciones de frío y calor, son proporcionales a la "carga térmica" que el sistema de termorregulación del cuerpo humano debe neutralizar. Esta carga fue definida por Fanger como la diferencia entre la potencia térmica neta metabólica (M-W) en la situación considerada y la potencia térmica que el individuo arrojaría si estuviera en las condiciones de bienestar (PMV = 0) con el valor real de (M-W), es decir:

[E9] $\Delta Q = M \cdot (1-\eta) - Q_c^* - Q_r^* - Q_k^* - Q_{trp}^* - Q_{sdz}^* - Q_{rps} - Q_{rpl}$

Donde los términos con (*) se calculan en condiciones de bienestar.

El procesamiento de los datos detectados permitió a Fanger establecer la siguiente correlación estadística entre el índice de bienestar PMV (Predicted Mean Vote) y la carga de calor que actúa sobre el cuerpo humano:

[E10] $PMV = (0{,}303 \cdot e^{-0{,}036\ M/Ap} + 0{,}028) \cdot \Delta Q / A_p$

El índice PMV predice el valor medio de los votos de la sensación térmica emitidos por un gran número de personas expuestas a las mismas condiciones ambientales. Sin embargo, los votos individuales se dispersan alrededor del valor medio con la distribución que se muestra en la Tabla 5, sobre una muestra de 1300 sujetos. Por lo tanto, el PMV es útil para predecir el número de personas presumiblemente no satisfechas por tener una sensación de calor (2) o mucho calor (3) o frío (-2) o mucho frío (-3) en la escala de siete valores del PMV.

El índice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) representa el porcentaje previsible de personas descontentas por "sentir" el ambiente demasiado caliente o demasiado frío, votando -2, -3, 2, 3.

Tabla 5
Distribución porcentual de los votos

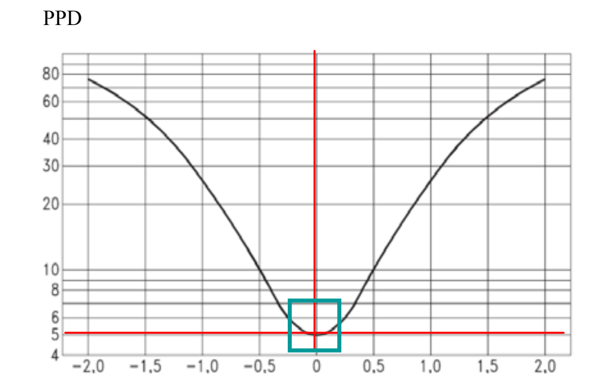
PMV calculado	*Porcentaje esperado de personas que votan*						
	0	***+1***	***+2***	***+3***	***-1***	***-2***	***-3***
+2	5%	20%	45%	30%			
+1	27%	48%	20%	5%			
0	55%	20%	**2.5%**	0%	20%	**2.5%**	0%
-1	27%				48%	20%	5%
-2	5%				20%	45%	30%

Como puede verse en la tabla, para un PMV = 0 existe un PPD equivalente al 5% de, es decir, un total del 5% de las personas votarían -2, -3, 2, 3. Basándose en los datos detectados por Fanger el porcentaje de insatisfechos se puede expresar en función del PMV a través de la relación:

[E 11] $PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.3355PMV4 + 0.2179PMV^2)}$

El resto del grupo, igual a (1-PPD) %, juzga el ambiente neutro, o ligeramente caliente, o ligeramente frío.

PPD



PMV

Fig. 5. Relación entre PMV y PPD.





Todas las deducciones introducidas hasta ahora se basan en datos experimentales, que fueron recogidos en una cámara de prueba en la que las magnitudes del entorno físico (t_a, t_{rm}, ω_a, φ_a) eran uniformes y constantes en el espacio y tiempo. Por consiguiente, la evaluación de PMV según lo establecido anteriormente proporciona información completa sólo en el caso de "ambiente térmico uniforme", similar a las condiciones producidas en la cámara de ensayo.

El verdadero ambiente térmico es generalmente no uniforme y la velocidad del aire nunca es constante en el tiempo. Todo esto hace que se hayan realizado investigaciones experimentales adecuadas sobre las causas específicas de *discomfort* en el que se han realizado.

El modelo de Fanger presenta dos importantes limitaciones: la primera es la restricción explícita de la temperatura de la piel y la pérdida de calor por evaporación. La segunda, de carácter empírico, es el que sólo se aplica en humanos expuestos durante un largo periodo a condiciones constantes cuyas características pueden ser medidas con exactitud, por ejemplo el aislamiento de la ropa y la tasa metabólica (Fig.5).

3.5. Ambiente térmico aceptable en términos de confort térmico: La norma UNI EN ISO 7730

La norma UNI EN ISO 7730 “Moderate thermal environments– determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort”, basada en los estudios realizados por Fanger, establece los requisitos para los ambientes térmicos aceptables, definiendo los rangos de las magnitudes físicas que producen condiciones aceptables en los ambientes.

El estándar recomienda lograr las condiciones ambientales que sean satisfactorias para el 90% de los ocupantes (o para lograr un porcentaje de insatisfechos de no más del 10%) que corresponde a un valor de PMV entre -0,5 y +0,5.

En cuanto al *discomfort* localizado, la norma establece lo siguiente:

- asimetría radiante $\Delta tr < 10$ °C cerca de las superficies acristaladas o frías, calculada a 60 cm del suelo;
- asimetría radiante $\Delta tr < 5$ °C cerca de un techo radiante, calculada a 60 cm del suelo;
- velocidad del aire < 0,15 m/s (invierno), < 0,25 m/s (verano);
- gradiente de temperatura entre 0,1 m y 1,1 m < 3 °C;
- temperatura del pavimento entre 19 °C y 29 °C (en invierno, actividad sedentaria);

Tabla 6
Condiciones ambientales satisfactorias para lograr el confort en verano e invierno

Magnitudes	*Invierno*	*Verano*
Resistencia térmica del vestido	Icl=1CLO≅0.155m^2°C/W	Icl=0.5CLO≅0,08m^2°C/W
Actividad Física	M ≤ 1,2 met ≅ 70 W/m^2	M ≤ 1,2 met ≅ 70 W/m^2
Temperatura operativa con φa = 50%	20°C < t_o < 24°C	23° C< t_o <26°C
Gradiente vertical entre h = 0,1m y h = 1,1m	$ta_{,1.1}$ - $ta_{,0.1}$ <3°C	$ta_{,1.1}$ - $ta_{,0.1}$ <3°C
Diferencia de temperatura radiante plana medida a h = 0,6m	$\Delta t_{r,s\text{-}p}$ <5°C $\Delta t_{r,p\text{-}p}$ <10°C	No definido, se puede poner igual al valor de invierno, de acuerdo con la norma ASHRAE
Temperatura del suelo	19°C < t_a <29°C	19°C < t_a <29°C
Molestia por corrientes de aire DR	DR <15%	DR <15%

Con las hipótesis de vestimenta y actividad física más comunes en los lugares de trabajo de las tablas del PMV o de la ecuación [E11] se obtienen los valores resumidos en la Tabla 6. El metabolismo se mide en Met (1 Met = 58,15 W/m^2 de superficie del cuerpo). Un adulto de constitución media tiene una superficie de 1,7 m^2 en su cuerpo. El rango de valores que puede alcanzar el metabolismo de una persona es amplio, en función de las actividades que realice (Tabla 7).

Tabla 7
Valores más comunes de producción de energía metabólica (met), norma UNI EN ISO 7730

Actividad	*Producción de energía metabólica*	
	W/m^2	*Met*
Tumbado	46	0,8
Sentado, relajado	58	1,0
Actividad ligera, sentado	70	1,2
Actividad ligera, de pie	93	1,6
Actividad media, de pie	116	2,0
Marcha en llano		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

La vestimenta de una persona se clasifica en función del aislamiento en cuanto a pérdida de energía que produce al cuerpo que lo lleva. Tanto el parámetro como la unidad para cuantificar la vestimenta, vienen denominados por el vocablo Clo. La escala Clo asigna a la ausencia de vestimenta el valor 0 y a un traje de vestir, el valor uno. El número de Clo que implica una prenda de ropa está tabulado y el valor de Clo que implica la vestimenta total se realiza mediante un sumatorio (Tabla 8). En el caso de la norma UNE-EN ISO 7730 se dan además combinaciones típicas de ropa y los respectivos valores de Clo.

3.6. Índices de confort

En el método de Fanger, las diferencias del resultado de las ecuaciones, por motivo de nacionalidad, sexo, edad y hora del día, no son significativas, motivo por el cual sus índices se han usado en muchos estudios y se han aplicado en varios proyectos.

El modelo ha servido de base a otros procedimientos para la determinación de la temperatura de "diseño" óptima en edificios, como el de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado ANSI-ASHRAE Standard 55, 1992 (y el de la Organización de Normas Internacionales ISO 7730:1995).

Hasta la fecha se han planteado decenas de índices de confort. De todos, los más utilizados son la Temperatura efectiva estándar, el PMV y los llamados modelos de adaptación. Estos son los únicos que han sido incorporados en normas internacionales: la temperatura efectiva estándar fue la base de la norma ANSI/ASHRAE 55-1981 y el PMV fue reglamentado en la norma ISO/CEN 7730-1993. Ambas normas han sido actualizadas varias veces, siendo la actualización más reciente la efectuada en la norma ASHRAE 55 (actualización emitida el 07/08/2004).

En dicha Norma se introduce una nueva manera de calcular el PMV, se combina con la temperatura efectiva estándar y se propone un índice de adaptación para ser utilizado en edificaciones acondicionadas por medios pasivos.

En el "Handbook of Fundamentals, ASHRAE 1997" se clasifican los índices según tres clases:

- ÍNDICES DIRECTOS. Mediciones de temperatura de bulbo seco y húmedo, temperatura de rocío, humedad relativa, velocidad del aire.
- ÍNDICES RACIONALES. Derivan de la ecuación general de balance térmico: temperatura media radiante, temperatura operativa, temperatura operativa húmeda, índice de estrés térmico.
- ÍNDICES EMPÍRICOS basados en respuestas subjetivas: temperatura efectiva ET, temperatura efectiva estándar SET, PMV, PPD, índice de viento frio WCI, índice de Temperatura Global de Bulbo Húmedo WBG.

El índice de temperatura efectiva (ET) fue desarrollado por Houghten y Miller de ASHRAE [8]. Los factores que incluyen son temperatura, humedad y velocidad del aire. Fue establecida como aquella temperatura de un aire quieto y saturado que produce la misma sensación subjetiva térmica que el aire considerado. Relaciona temperatura húmeda y seca con respuesta humana.

El índice de temperatura efectiva estándar SET - Standard Effective Temperature fue concebido en los años 70 por los investigadores Gonzales, Gagge y Nishi [9] a partir del índice de temperatura efectiva planteado en 1923 por Houghton y Miller. Se define como la temperatura de bulbo seco de un recinto uniforme sin corrientes de aire y humedad relativa igual a 50% en el cual las personas, portando ropa ligera (0.6 Clo) y realizando una actividad sedentaria (1 Met), tendrían, después de una hora, el mismo intercambio neto de calor por radiación, convección y evaporación que en el ambiente real considerado (y por lo tanto la misma sensación térmica). La premisa es que cualquier condición ambiental pueda valorarse por medio de un valor de temperatura efectiva estándar relacionado con una sensación térmica específica.

Tabla 8
Combinaciones típicas de ropa y respectivos valores de Clo, norma UNI EN ISO 7730

Ropa de trabajo	I_{cl}		*Ropa de uso diario*	I_{cl}	
	Clo	*m^2K/W*		*Clo*	*m^2K/W*
Calzoncillos, camisa, pantalón, chaqueta, calcetines, zapatos	0,85	0,135	Bragas, medias, camisa de manga corta, falda, sandalias	0,55	0,085
Calzoncillos, camisa, bata, calcetines, zapatos	0,90	0,140	Calzoncillos, camisa, pantalón, ligero, calcetines, zapatos	0,60	0,095
Ropa interior de manga corta y pantalón corto, camisa, pantalón, chaqueta, calcetines, zapatos	1,00	0,155	Bragas, combinación, medias, vestido, zapatos	0,70	0,105
Ropa interior de manga corta y pantalón corto, camisa, pantalón, mono, calcetines, zapatos	1,10	0,170	Ropa interior, camisa, pantalón, calcetines, zapatos	0,70	0,110
Ropa interior de manga corta y pantalón largo, chaqueta termoaislante, calcetines, zapatos	1,20	0,185	Ropa interior, chándal (sudadera y pantalón), calcetines altos, zapatos de deporte	0,75	0,115





Esta relación fue investigada por medio de encuestas, dando como resultado la siguiente escala (Fig.6). Con la finalidad de dar cuenta de todo tipo de ambientes (es decir, con la finalidad de identificar con un valor de temperatura efectiva estándar ambientes con combinaciones variables de los principales parámetros de confort) se trazaron líneas de igual temperatura efectiva estándar (o líneas de igual sensación térmica) y subsiguientemente zonas de confort apelando al diagrama psicométrico y al concepto de temperatura operativa (de esta forma se agregan la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la velocidad del aire y la humedad).

TES (°C)	Sensación de temperatura	Sensación de confort	Procesos reguladores
40		Límite tolerable	Evaporación del sudor ineficaz
	Muy caliente	Malestar acentuado	Mucho sudor
35	Caliente	Malestar	
	Cálido	Malestar leve	Sudor visible
30			
	Ligeramente cálido		
25	Neutro	Confortable	Ausencia de sudor
	Fresco		
20			
	Ligeramente frío	Malestar leve	Acciones conscientes de adaptación
15			
	Frío		
10			Temblores
	Muy frío	Malestar	

Fig. 6. Respuesta humana frente a diferentes temperaturas efectivas estándar.

La siguiente figura (Fig. 7) muestra las zonas de confort cuando la actividad que se realice sea ligera y se lleve puesta ropa de invierno o de verano.

La zona de confort con mayor aplicabilidad, por lo general, es la que se define en el ASHRAE HANDBOOK 1993 [10], dibujada sobre un diagrama psicométrico (que relaciona temperatura del aire y humedad relativa) y que especifica límites de confort en temperatura del aire y temperatura del clima interior en un recinto, cuyos valores son mantenidos mediante un sistema mecánico de acondicionamiento de aire, actuando sobre personas con actividad sedentaria. Representar zonas de confort sobre diagramas psicométricos da lugar a diagramas bioclimáticos o cartas bioclimáticas.

La zona del diagrama psicométricos correspondiente a las condiciones en las que un adulto percibe el confort térmico ha sido estudiada y definida en la NORMA 55 1992 de la ASHRAE a partir de la temperatura efectiva.

El estándar ASHRAE 55-2004 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy es el resultado del propósito de actualización de la norma incluyendo tanto los postulados de Fanger como la introducción del concepto de diferentes niveles de adaptación (conductual, fisiológico, y psicológico): es el Adaptive Comfort Standard (ACS) para edificaciones ventiladas naturalmente durante el verano, basado en la ecuación de regresión lineal del modelo adaptativo propuesto por Brager y De Dear (2001) [11].

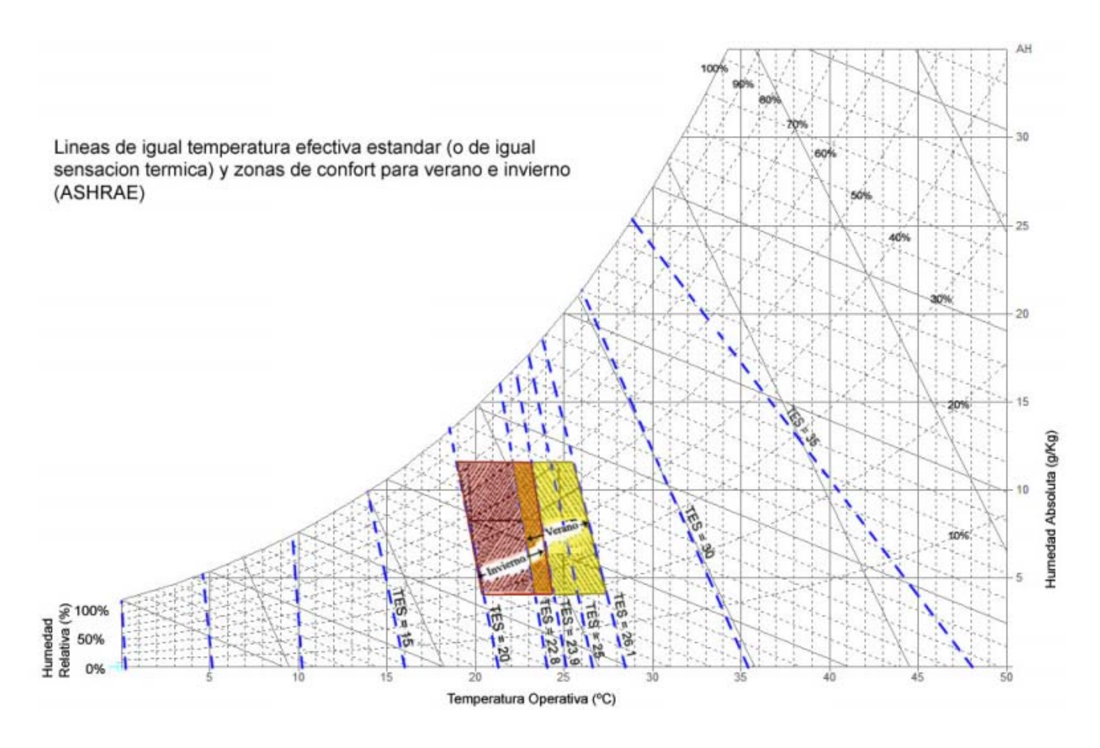


Fig.7. Líneas de igual temperatura efectiva estándar y zonas de confort para invierno y verano. ASHRAE 55.

3.7. Modelos de adaptación

Existe una relación directa entre la temperatura interior deseada por los individuos y la temperatura media exterior, esto es debido a que las personas que habitan en climas cálidos y húmedos dentro de espacios naturalmente ventilados, han desarrollado una capacidad de adaptación térmica a su entorno, lo que revalida el modelo de adaptación.

Los trabajos iniciales de Humpreys (1978) [12] establecieron varios conceptos importantes que han permitido el desarrollo posterior de los modelos de adaptación. El primero es el concepto de temperatura de neutralidad, asumida generalmente como temperatura de confort, la cual se obtiene de un análisis de regresión lineal que correlaciona las respuestas dadas por personas en un estudio de campo (subjetivas) y los valores de los parámetros climáticos medidos con instrumentos (objetivos).

El segundo concepto es la dependencia encontrada entre la temperatura de neutralidad y la temperatura media exterior. Brager y De Dear (1998, 2001) [13] realizaron estudios comparativos entre edificios naturalmente ventilados y edificios con uso de calefacción y aire acondicionado, cuyos resultados fueron similares a los demostrados por Humphreys, estos argumentan que los ocupantes de los edificios ventilados artificialmente tienen diferentes expectativas que los ocupantes de los edificios naturalmente ventilados.

De esta manera, ambos estudios manifiestan que la temperatura de confort (T_c) mantiene una relación estable y directa con la temperatura media exterior (T_o), y presentan una ecuación para determinar la temperatura de confort:

[E12] $$T_c = 13.5 + 0.54\ T_o$$

Donde "T_o" es en este caso la temperatura exterior promedio mensual.

En otros reportes de estudios basados en el enfoque adaptativo para diferentes climas y culturas se obtuvieron como resultado modelos de aplicación generalizada basados en la temperatura operativa de confort como función de la temperatura exterior promedio, en la forma genérica $T_n = b + m\ (T_{em})$ (Tabla 9).

Donde:

- T_n = Temperatura de neutralidad o confort.
- b = Punto donde la recta de regresión corta el eje de las ordenadas.
- m = Pendiente de la recta de regresión.
- T_{em} = Temperatura exterior promedio.

Los modelos obtenidos resultaron muy cercanos a los producidos en otros estudios similares:

Tabla 9.
Valores de b (punto donde la recta de regresión corta al eje de las ordenadas) y m (pendiente de la recta de regresión) para la construcción de modelos de confort térmico.

Autor	b	m
Humphreys (1976)	11.9	0.534
Auliciems (1981)	17.6	0.31
Griffiths (1990)	12.1	0.534
Nicol et al. (1993)	17.0	0.38
Brager/de Dear (1998)	17.8	0.31
Humphreys/Nicol (2000)	13.5	0.54

El modelo adaptivo utilizado en el estándar ASHRAE 55-2004 es aplicable sólo para los espacios donde las condiciones térmicas son reguladas principalmente por los ocupantes a través de la apertura y cierre de ventanas, no hay refrigeración mecánica y el rango de las tasas metabólicas varía de 1,0 a 1,3 Met (58,15 a 75,6 W/m^2).

La gama de temperaturas operativas aceptables (Fig.8) es una función de la temperatura exterior, y se basa en un modelo adaptativo de confort térmico desarrollado a partir de una investigación patrocinada por ASHRAE: se deriva el modelo de una base de datos global de 21.000 mediciones tomadas principalmente en edificios de oficinas de cuatro continentes diferentes.

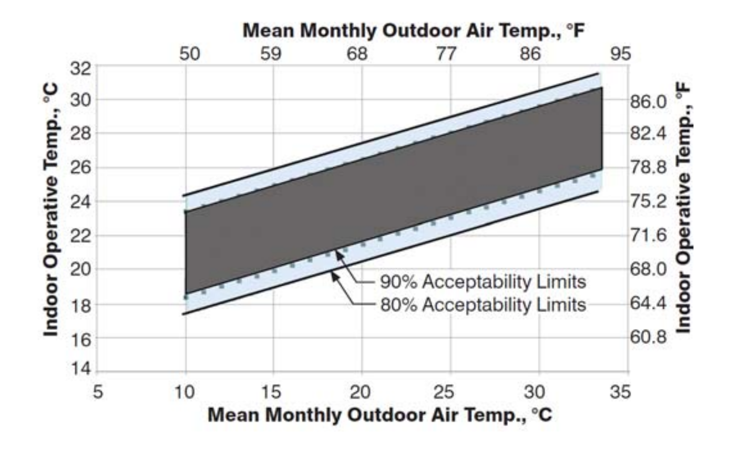


Fig. 8. Rangos aceptables de temperatura operativa de los espacios acondicionados de forma natural.

La investigación demostró que, cuando los ocupantes tienen la posibilidad de abrir las ventanas y están acostumbrados a las condiciones más conectadas a los cambios naturales del clima exterior, la noción subjetiva de confort y de temperaturas preferidas cambiarán como resultado de la disponibilidad del control, la experiencia térmica diferente, y los cambios resultantes en las percepciones o expectativas de los ocupantes.

Dado que el modelo se basa en datos de campo que ya tienen en cuenta la adaptación de la ropa, no es necesario estimar los valores de Clo para el espacio.





Los datos tienen también en cuenta los efectos locales de *discomfort* térmico típicos de los edificios, por lo que no es necesario hacer frente a estos factores cuando se utiliza esta opción. No se requieren límites de humedad (los límites de humedad sólo se aplican cuando no existe un sistema diseñado para controlar la humedad), y no son necesarios límites de velocidad de aire cuando se utiliza esta opción.

4. Climogramas

Los climogramas son unas de las herramientas más difundidas y útiles para poder interpretar las peculiaridades climáticas de un emplazamiento concreto y establecer estrategias bioclimáticas con las que conseguir condiciones de confort en el interior de los edificios durante un mayor periodo de tiempo (sin un consumo de energía asociado).

Los climogramas son gráficos psicométricos en los que se representan los valores de humedad y temperatura de una zona en un período determinado.

Los climogramas deben utilizarse en las fases iniciales del proyecto, es decir, cuando la orientación, el porcentaje y disposición de los huecos en fachada, los materiales, la volumetría, etc. no están aún definidos.

En este apartado se van a mostrar las pautas generales que se han de seguir para poder manejar correctamente los climogramas.

4.1. Bases de datos climáticos

Para poder construir un climograma es necesario contar con una base de datos climáticos adecuada, es decir, que recoja la temperatura y humedad media de una zona en un periodo de tiempo suficientemente amplio. Los climogramas deben caracterizar un clima, están diseñados para identificar y representar parámetros generales, no así particularidades. Si elaboramos un climograma considerando los datos registrados en un año concreto, no se podrán establecer estrategias bioclimáticas efectivas (ya que puede tratarse de un año atípico para ese clima). Por consiguiente, debido al carácter generalista de los climogramas, las estrategias bioclimáticas que se definan tampoco podrán satisfacer todas las necesidades de carácter excepcional (como una ola de calor, un aumento atípico de las temperaturas, un verano inusualmente frío, etc.).

Existen numerosas bases de datos climáticos, entre ellas una de las más importantes es METEONORM, ya que recoge datos a nivel mundial. Por otro lado, la mayoría de los países cuenta con su propia agencia estatal de meteorología (como es el caso de AEMET en España), además de otros organismos de carácter más local (agencias territoriales o municipales).

Por otro lado, la Agencia de Energía de Estados Unidos, cuenta con una base de datos climáticos en formato EnergyPlus Weather (epw) de gran utilidad para trabajar con programas de simulación. Esta base de datos se nutre de diferentes fuentes y está ampliándose continuamente, además se puede descargar directamente (y gratuitamente) desde su página web:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm

Entre las fuentes más importantes se encuentran:

- IWEC[1] International Weather for Energy Calculations, donde se recogen actualmente un total de 277 ciudades de todo el mundo.
- SWEC[2], Spanish Weather for Energy Calculations, estos archivos climáticos cubren las 52 capitales de provincia españolas.

4.2. Tipos de climogramas

Desde que B. Givoni y V. Olgyay presentaran sus famosos climogramas, se han desarrollado varias aplicaciones informáticas entre las que destaca CLIMATE_CONSULTANT, desarrollado por la Universidad de California en Los Angeles y que se puede descargar de manera gratuita desde la siguiente página web:

http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu

Una de las grandes ventajas de este programa es que utiliza archivos climáticos de extensión EPW (Energy Plus Weather Data). Además, permite elegir entre otros, el modelo de confort ASHRAE 55-2004 PMV (en el que se pueden definir los parámetros específicos de uso: Clo, Met, etc.).

El climograma (o Psychrometric Chart en CLIMATE CONSULTANT) tiene una doble entrada de datos, la temperatura seca está recogida en el eje x y la cantidad de humedad, en el eje y, también considerada humedad absoluta y puede representarse como gramos de agua por kilo de aire seco, o como presión de vapor. La curva exterior más a la izquierda es la línea de saturación (100% de humedad relativa) y refleja el hecho que el aire a una temperatura inferior puede soportar menos humedad que a una temperatura superior. Todas las horas registradas en un archivo climático EPW se representan con un punto en esta carta. Algunos puntos representan más de una hora, cuando una misma temperatura y humedad ocurren en un mismo periodo. También hay que considerar que determinados puntos pueden estar en zonas de criterios diferentes.

Desde el punto de vista de visualización de los datos, es recomendable seleccionar la opción de representación de dichos puntos agrupados en máximos y mínimos para cada mes, facilitando de este modo su interpretación.

Un vez que los datos están correctamente representados en el climograma es el momento de identificar las estrategias bioclimáticas más adecuadas para integrarlas, posteriormente, en el edificio que se esté diseñando.

---

[1] Resultado del proyecto ASHRAE. 2001. *International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM*, Atlanta: ASHRAE.

[2] Originalmente desarrollado para el uso del programa CALENER, el programa de certificación energética de España.

Para ello es importante definir una serie de parámetros con los que determinar el ámbito de actuación de cada una de las diferentes estrategias en función del modelo de confort elegido.

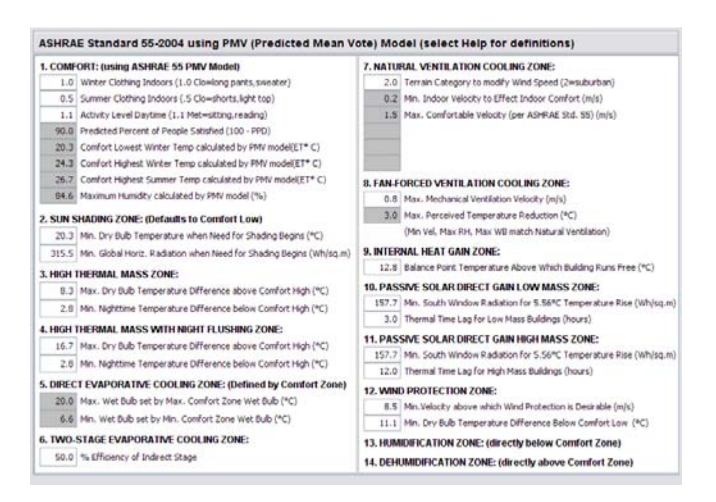
Por esta razón, CLIMATE CONSULTANT permite trabajar según diferentes modelos de confort:

- California Energy Code Comfort Model, 2008: el rango de temperatura de confort se establece entre 21,1ºC y 23,9ºC. La humedad relativa máxima es del 80%, y una temperatura de rocío mínima de -2,8ºC. Este es el modelo de confort de temperatura utilizado por defecto en CLIMATE CONSULTANT.
- ASHRAE Handbook of Fundamentals Comfort Model, 2005: con una vestimenta adecuada en invierno, la temperatura efectiva se establece entre 20ºC y 23ºC (con un 50% de humedad relativa), lo que significa que la temperatura decrece ligeramente cuando aumenta la humedad. El límite superior de temperatura de bulbo húmedo es de 17,8ºC y una temperatura de rocío mínima de 2,2ºC. Con una vestimenta adecuada en verano la zona de confort aumenta en 2,8ºC.
- ASHRAE Standard 55-2004 using PMV (Predicted Mean Vote) Model: el confort térmico se basa en la temperatura de bulbo seco, la vestimenta (CLO), la actividad metabólica (MET), la velocidad del aire, la humedad y la temperatura media radiante. En los espacios cerrados, se supone que la temperatura media radiante es casi igual a la temperatura de bulbo seco. La zona en la que la mayoría de las personas sienten confort se calcula utilizando el modelo PMV. En los edificios residenciales la gente adapta su ropa a la estación y siente confort con velocidades de aire superiores teniendo así un mayor rango de confort que en los edificios con sistemas centralizados de climatización.
- Adaptative Comfort Model in ASHRAE Standard 55-2004: en los espacios ventilados naturalmente, donde los ocupantes pueden abrir y cerrar las ventanas, su respuesta térmica dependerá en parte del clima exterior, y puede tener un rango de confort más amplio que en los edificios con sistemas de climatización centralizados. Este modelo supone que los ocupantes adaptan su ropa a las condiciones térmicas y que son sedentarios (1,0 a 1,3 MET). No debe haber ningún sistema mecánico de refrigeración, este método no se aplica si está en funcionamiento un sistema de calefacción.

4.3. Parámetros. Modelo de confort ASHRAE 55 (PMV)

El modelo de confort ASHRAE Standard 55-2004 (PMV) es uno de los más utilizados por lo que en este apartado se mostrará su aplicación con el software.

En la siguiente imagen (Fig. 9) se muestra el cuadro de especificaciones con los que se establecen los parámetros que definen el campo de actuación de las distintas estrategias. En este apartado se definirán cada una de ellas.



ASHRAE Standard 55-2004 using PMV (Predicted Mean Vote) Model (select Help for definitions)

1. COMFORT: (using ASHRAE 55 PMV Model)
   - 1.0 Winter Clothing Indoors (1.0 Clo=long pants,sweater)
   - 0.5 Summer Clothing Indoors (.5 Clo=shorts,light top)
   - 1.1 Activity Level Daytime (1.1 Met=sitting,reading)
   - 90.0 Predicted Percent of People Satisfied (100 - PPD)
   - 20.3 Comfort Lowest Winter Temp calculated by PMV model(ET* C)
   - 24.3 Comfort Highest Winter Temp calculated by PMV model(ET* C)
   - 26.7 Comfort Highest Summer Temp calculated by PMV model(ET* C)
   - 84.6 Maximum Humidity calculated by PMV model (%)
2. SUN SHADING ZONE: (Defaults to Comfort Low)
   - 20.3 Min. Dry Bulb Temperature when Need for Shading Begins (°C)
   - 315.5 Min. Global Horiz. Radiation when Need for Shading Begins (Wh/sq.m)
3. HIGH THERMAL MASS ZONE:
   - 8.3 Max. Dry Bulb Temperature Difference above Comfort High (°C)
   - 2.8 Min. Nighttime Temperature Difference below Comfort High (°C)
4. HIGH THERMAL MASS WITH NIGHT FLUSHING ZONE:
   - 16.7 Max. Dry Bulb Temperature Difference above Comfort High (°C)
   - 2.8 Min. Nighttime Temperature Difference below Comfort High (°C)
5. DIRECT EVAPORATIVE COOLING ZONE: (Defined by Comfort Zone)
   - 20.0 Max. Wet Bulb set by Max. Comfort Zone Wet Bulb (°C)
   - 6.6 Min. Wet Bulb set by Min. Comfort Zone Wet Bulb (°C)
6. TWO-STAGE EVAPORATIVE COOLING ZONE:
   - 50.0 % Efficiency of Indirect Stage
7. NATURAL VENTILATION COOLING ZONE:
   - 2.0 Terrain Category to modify Wind Speed (2=suburban)
   - 0.2 Min. Indoor Velocity to Effect Indoor Comfort (m/s)
   - 1.5 Max. Comfortable Velocity (per ASHRAE Std. 55) (m/s)
8. FAN-FORCED VENTILATION COOLING ZONE:
   - 0.8 Max. Mechanical Ventilation Velocity (m/s)
   - 3.0 Max. Perceived Temperature Reduction (°C)
   - (Min Vel, Max RH, Max WB match Natural Ventilation)
9. INTERNAL HEAT GAIN ZONE:
   - 12.8 Balance Point Temperature Above Which Building Runs Free (°C)
10. PASSIVE SOLAR DIRECT GAIN LOW MASS ZONE:
    - 157.7 Min. South Window Radiation for 5.56°C Temperature Rise (Wh/sq.m)
    - 3.0 Thermal Time Lag for Low Mass Buildings (hours)
11. PASSIVE SOLAR DIRECT GAIN HIGH MASS ZONE:
    - 157.7 Min. South Window Radiation for 5.56°C Temperature Rise (Wh/sq.m)
    - 12.0 Thermal Time Lag for High Mass Buildings (hours)
12. WIND PROTECTION ZONE:
    - 8.5 Min.Velocity above which Wind Protection is Desirable (m/s)
    - 11.1 Min. Dry Bulb Temperature Difference Below Comfort Low (°C)
13. HUMIDIFICATION ZONE: (directly below Comfort Zone)
14. DEHUMIDIFICATION ZONE: (directly above Comfort Zone)

Fig. 9. Parámetros de las estrategias pasivas CLIMATE CONSULTANT.

1. Confort:

- Vestimenta de invierno en el interior del edificio 1,0 Clo (pantalón largo, jersey).
- Vestimenta de verano en el interior del edificio: 0,5 Clo (pantalón corto, camisa ligera).
- Actividad durante el día: 1,1 Met (sentado, lectura)
- Previsión de personas satisfechas según el modelo PMV: 90%.
- Temperatura mínima de confort en invierno según el *modelo PMV: 20,3ºC.*
- Temperatura máxima de confort en invierno según el modelo PMV: 24,3ºC.
- Temperatura máxima de confort en verano según el modelo PMV: 26,7ºC.
- Humedad máxima calculada según el modelo PMV: 84,6%.

2. Sombreamiento:

- Temperatura de bulbo seco mínima a partir de la cual se necesita sombreamiento: 20,3ºC.
- Radiación Global mínima sobre superficie horizontal para determinar la necesidad de sombreamiento: 315,5Wh/m^2.

3. Masa térmica:

- Máximo incremento de temperatura de bulbo seco sobre la máxima de confort: 8,3ºC.
- Mínima diferencia de temperatura nocturna bajo la máxima de confort: 2,8ºC.

4. Alta masa térmica con ventilación nocturna:

- Máximo incremento de temperatura de bulbo seco sobre la máxima de confort: 16,7ºC.
- Mínima diferencia de temperatura nocturna bajo la máxima de confort: 2,8ºC.

5. Enfriamiento evaporativo directo:

- Máxima temperatura de bulbo húmedo: 20ºC.
- Mínima temperatura de bulbo húmedo: 6,6ºC.

6. Enfriamiento evaporativo de dos etapas:

- Eficiencia de la etapa indirecta: 50%.

7. Enfriamiento por ventilación:

- Tipo de emplazamiento: 2,0 (suburbano).
- Velocidad del aire mínima efectiva para que incida sobre el confort en el interior: 0,2m/s.
- Velocidad máxima de confort según ASHRAE Std. 55: 1,5m/s.

8. Enfriamiento mediante ventilación forzada:

- Velocidad del aire mínima efectiva para que incida sobre el confort en el interior: 0,8m/s.
- Percepción máxima de descenso de temperatura: 3ºC.

9. Ganancias internas:

- Balance de temperatura sobre la que el edificio funciona por sí solo: 12,8ºC.

10. Ganancias solares y baja masa térmica:

- Radiación mínima incidente en ventana situada al sur para que ocurra un aumento de temperatura de 5,56ºC: 157,7 Wh/m^2.
- Desfase de la onda térmica para edificios de baja masa térmica: 3,0 horas.

11. Ganancias solares y alta masa térmica:

- Radiación mínima incidente en ventana situada al sur para que ocurra un aumento de temperatura de 5,56ºC: 157,7 Wh/m^2.
- Desfase de la onda térmica para edificios de baja masa térmica: 12,0 horas.

12. Protección contra el viento:

- Velocidad mínima para la que se requiere protección del viento: 8,5 m/s.
- Diferencia de temperatura mínima por debajo de la zona de confort: 11,1 ºC.

13. Humidificación

14. Deshumidificación

4.4. Estrategias bioclimáticas

En este apartado se definen las diferentes estrategias bioclimáticas y se acompañan de una serie de gráficos que identifican y zonifican cada una de las estrategias en el climograma (el climograma utilizado corresponde a la ciudad de Madrid).

4.4.1. Confort

Está compuesto por dos zonas de confort, una para la vestimenta de verano y otra para invierno y una temperatura máxima ligeramente superior considerando que en un ambiente con aire más seco la gente se encuentra en confort a temperaturas superiores. Con este modelo se considera que la temperatura media radiante (MRT) es similar a la temperatura de bulbo seco, lo cual significa, por ejemplo, que se ha provisto protección solar (Fig.10).

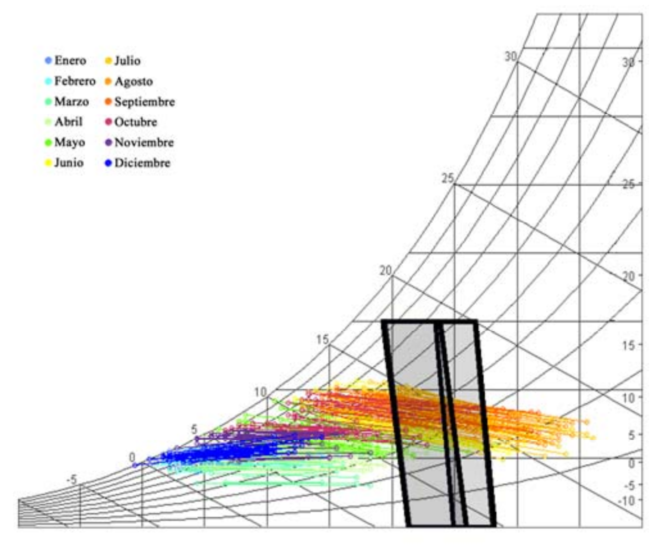


Fig. 10. Zona confort (invierno/verano).

4.4.2. Sombreamiento

La necesidad de sombreamiento se define para una temperatura seca exterior de 20,3ºC y una radiación global mínima sobre superficie horizontal de 315,5Wh/m^2. Cuando se alcancen estos valores todas las ventanas de un edificio deberán estar en sombra (Fig.11). Se considera que a partir de esa temperatura, la incidencia de la radiación solar en el interior de un edificio no favorece al confort y por lo contrario, contribuirá a sobrecalentar el interior. Para edificios con cargas internas elevadas ocasionadas, por ejemplo, por la iluminación artificial o por los equipos instalados (ordenadores, etc.), es recomendable que el límite superior se reduzca en torno a los 2 ó 5 ºC.

La radiación incidente sobre superficie horizontal para que la que es necesaria protección solar en climas cálidos es de 157,7 Wh/m^2 pero en climas más fríos con cielos nubosos puede superar incluso los 630,9 Wh/m^2. La protección solar en el exterior es particularmente efectiva para controlar la temperatura radiante y por otro lado, para evitar un incremento de la temperatura en el interior a través de las ventanas. Hay que apuntar que el sombreamiento por sí solo no garantiza el confort.

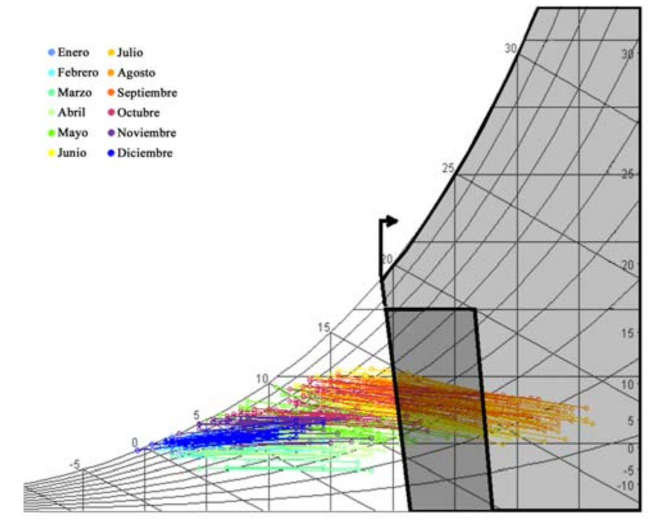


Fig. 11. Zona de sombreamiento.

4.4.3. Masa térmica

La alta masa térmica en el interior de los edificios se considera como una buena estrategia de enfriamiento pasivo. En el climograma queda representado a la derecha de la zona de confort (Fig.12). La masa térmica se caracteriza por su capacidad de almacenaje térmico, desfase de la onda térmica y de potencial de humidificación. Gracias a esta estrategia, las fuertes variaciones de temperatura diurnas en el exterior se amortiguan y pasan a ser suaves variaciones de temperatura en el interior, es la razón por la que la utilización de alta masa térmica es una estrategia adecuada para climas cálidos y secos. La necesidad de masa térmica se determina para una diferencia de temperatura máxima sobre la máxima establecida para el confort y para una diferencia temperatura mínima nocturna, inferior a la máxima de confort del día anterior.

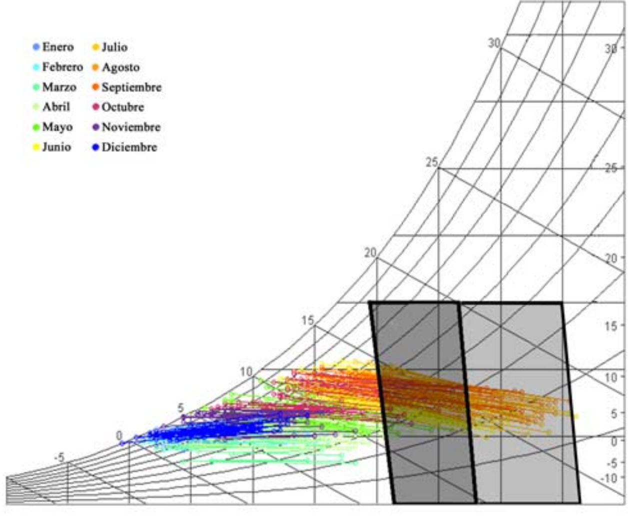


Fig. 12. Zona de masa térmica.

4.4.4. Alta masa térmica con ventilación nocturna

Esta estrategia se recoge en el climograma en horizontal y a la derecha de la zona de confort (hay que tener en cuenta que esta zona es más extensa que la de alta masa térmica y por lo tanto, queda superpuesta). Esta estrategia combina la alta masa térmica en el interior del edificio con el aprovechamiento de la ventilación nocturna como estrategia pasiva de enfriamiento. Durante el día, el edificio debe cerrarse para protegerse de las altas temperaturas (Fig.13).

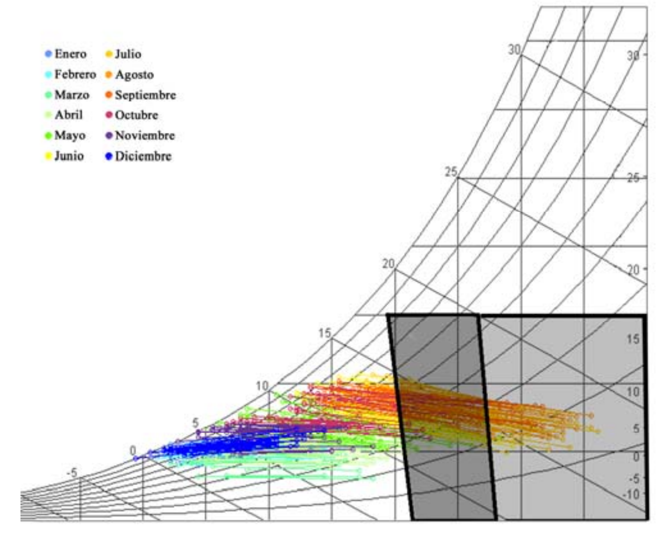


Fig. 13. Zona de masa térmica con ventilación nocturna.

Gracias a esta estrategia, la variación de temperatura diurna exterior se verá mitigada en el interior del edificio. La alta masa térmica acompañada de ventilación nocturna es una buena técnica para climas cálidos y secos. Su aplicabilidad se determina por la diferencia de temperatura máxima (16,7ºC) sobre la máxima establecida para el confort y por una diferencia temperatura mínima nocturna (2,8ºC), inferior a la máxima de confort del día anterior. El límite superior e inferior de la alta masa térmica también considera la temperatura de rocío de la zona de confort. Estos valores deben ser analizados hora a hora.

4.4.5. Enfriamiento evaporativo directo

Esta estrategia se recoge en el climograma en la parte inferior y a la derecha de la zona de confort. El enfriamiento evaporativo ocurre cuando el agua pasa de estar en estado líquido a estar en estado gaseoso (absorbiendo calor latente de fusión), así el aire se convierte más fresco pero más húmedo también (Fig.14).

La evaporación sigue la línea de temperatura de bulbo húmedo en el climograma. El enfriamiento evaporativo es una estrategia apropiada para climas cálidos y secos. Esta zona queda definida automáticamente por la temperatura de bulbo húmedo máxima (20ºC) y mínima dentro de la zona de confort (6,6ºC).

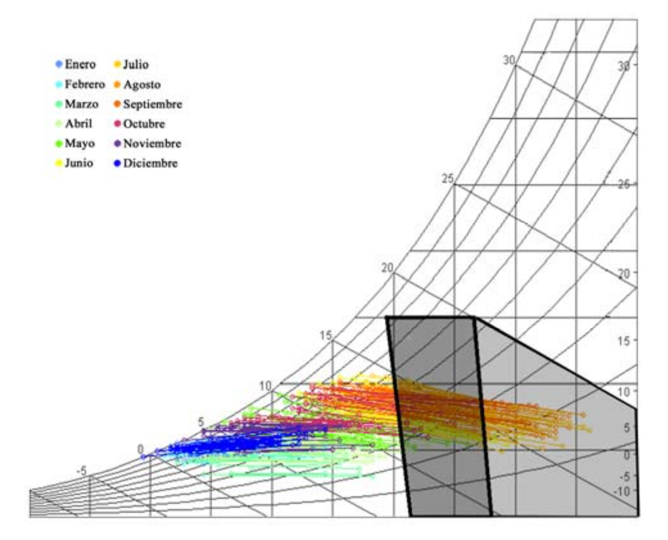


Fig. 14. Enfriamiento evaporativo directo.

4.4.6. Enfriamiento evaporativo de dos etapas

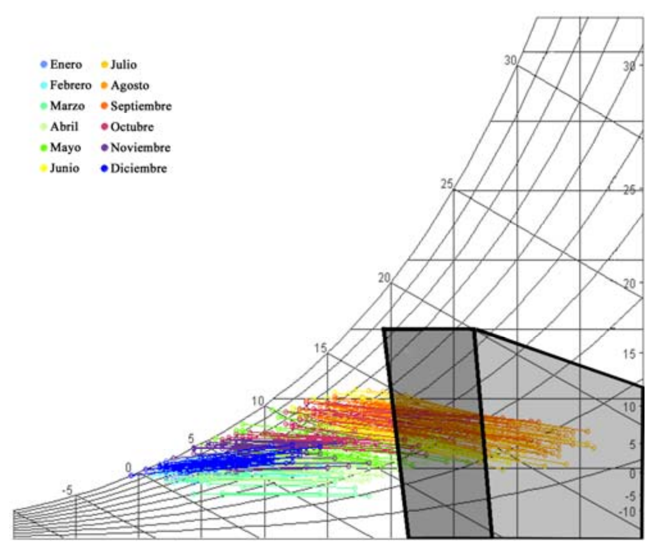


Fig. 15. Enfriamiento evaporativo de dos etapas.

Esta estrategia se define como una modificación del enfriamiento evaporativo (Fig.15). El límite superior se establece definiendo el porcentaje de eficiencia de la fase indirecta y desvía la línea mediante el porcentaje específico de la distancia entre la máxima temperatura de confort y la máxima temperatura de bulbo húmedo definida en la estrategia de enfriamiento evaporativo. En la primera fase, el agua se utiliza para enfriar el exterior de un intercambiador de calor de donde se toma el aire de renovación. En la segunda fase, ese aire se enfría mediante enfriamiento evaporativo.

4.4.7. Enfriamiento por ventilación

En los climas cálidos y húmedos, el movimiento de aire es una de las pocas estrategias para producir una sensación de enfriamiento en el cuerpo humano (Fig.16). Esto ocurre al aumentar la evaporación mediante la sudoración y aportando la sensación psicológica de enfriamiento (esto no significa que la ventilación reduce la temperatura). La velocidad del viento depende de los obstáculos. Los datos climáticos suelen recogerse habitualmente en superficies planas, categoría 3. Las áreas urbanas, suburbanas y arboladas tiene la categoría 2. Las grandes expansiones de núcleos urbanos tienen la categoría 1.

CLIMATE CONSULTANT asume que la altura del edificio es de 10 metros, la cual es la misma que la altura establecida en los instrumentos de medición (ASHRAE Fundamentals 2005). CLIMATE CONSULTANT considera que las aperturas en un edificio pueden adaptarse para aprovechar bajas velocidades de viento o para reducir las altas velocidades a velocidades confortables, y que el edificio está diseñado para una adecuada ventilación cruzada o efecto chimenea que garanticen velocidades adecuadas de confort.

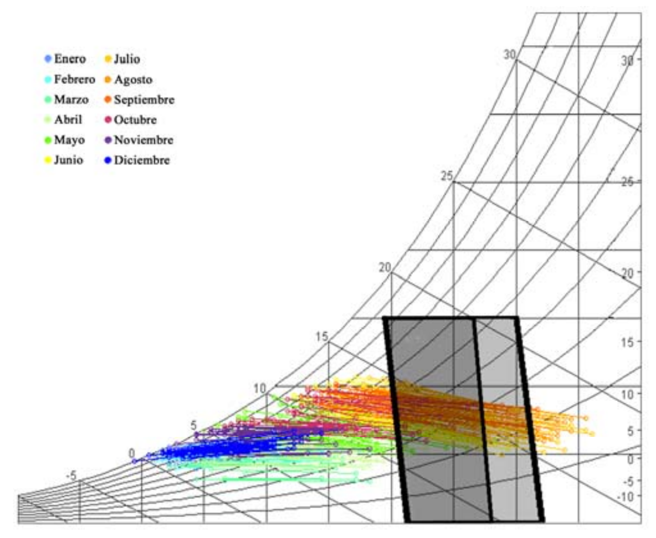


Fig. 16. Enfriamiento por ventilación.

El enfriamiento mediante la ventilación es un proceso complejo y puede definirse de diferentes maneras. En CLIMATE CONSULTANT se considera que la velocidad mínima para que afecte al confort, es al menos 2m/s. Si la velocidad del viento exterior desciende de este mínimo, se considera que la ventilación natural para enfriamiento no es efectiva.

También se define una velocidad máxima (a partir de la cual la gente se encuentra en *discomfort*). Para una actividad sedentaria, la velocidad máxima admisible es de 0,82m/s, que es apenas apreciable, pero en el interior, cuando la gente puede moverse, la máxima sería de 1,6m/s o incluso superior, que produce una ligera brisa que se puede notar en la cara y que hace que se muevan los papeles. Esta velocidad del aire producirá una sensación de confort equivalente a una reducción de temperatura de 2,5ºC para el primer caso y de 3,7ºC en el segundo caso (ASHRAE Standard 55-2004). Hay que apuntar que cuando la gente puede controlar la velocidad del aire, las personas pueden tolerar un rango de confort más amplio.





El máximo de esta zona está definido por un máximo de humedad relativa y un máximo de temperatura de bulbo húmedo. Por encima de estos valores, es tan húmedo que es preciso el uso del aire acondicionado, en muchos de los casos para reducir la cantidad de humedad más que la temperatura.

4.4.8. Enfriamiento mediante ventilación forzada

Cuando se requiere ventilación para enfriamiento, el movimiento de aire puede crearse por ventiladores centralizados o por ventiladores individuales de sobremesa. En los climas cálidos y húmedos, el movimiento de aire es una de las pocas maneras para producir una sensación de enfriamiento en el cuerpo humano (Fig.17).

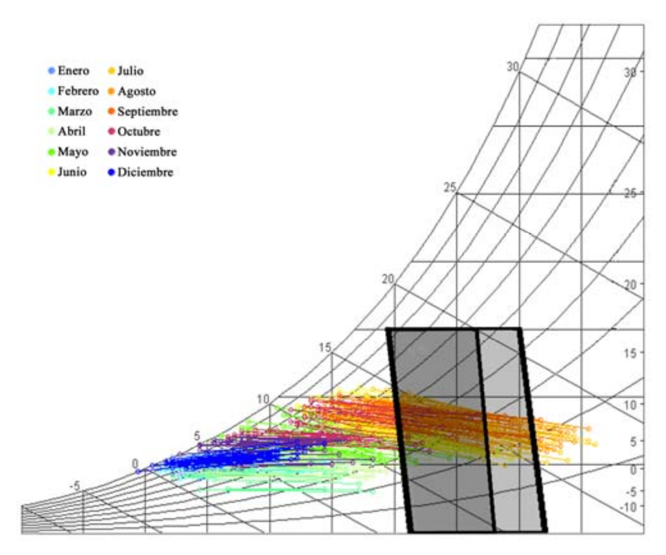


Fig. 17. Enfriamiento mediante ventilación forzada.

Esto ocurre al aumentar la evaporación mediante la sudoración y aportando la sensación psicológica de enfriamiento (lo que no significa que la ventilación disminuya la temperatura). Es un proceso complejo y se puede definir según los mismos límites establecidos en el caso de la ventilación natural exceptuando que la velocidad máxima para la ventilación mecánica puede definirse de manera separada, es decir, mediante un máximo de la velocidad confortable (a partir de la cual la gente siente *discomfort*).

Para una actividad sedentaria, la velocidad máxima admisible es de 0,82m/s, que es apenas apreciable, pero en el interior, cuando la gente puede moverse la máxima sería de 1,6m/s o incluso superior, que produce brisa y que se puede notar en la cara y que hace que se muevan los papeles. Esta velocidad del aire producirá una sensación de confort equivalente a una reducción de temperatura de 2,5ºC para el primer caso y de 3,7ºC en el segundo caso (ASHRAE Standard 55-2004).

Hay que apuntar que cuando la gente puede controlar la velocidad del aire de alguna manera, se puede tolerar un rango de confort más amplio. La velocidad del aire mínima efectiva es de 2m/s, se supone que por debajo no es efectiva. El límite superior se establece arbitrariamente según los mismos límites que en la ventilación natural. Por encima de estos valores, es tan húmedo que es preciso el aire acondicionado, en la mayoría de los casos para reducir la humedad más que la temperatura.

4.4.9. Ganancias internas

Esta zona representa una estimación de la cantidad de calor que se genera por la iluminación, los equipos y la propia ocupación. Depende en gran medida del tipo y diseño del edifico. Los edificios que cuentan con un buen diseño, un adecuado aislamiento y que además aprovechen las ganancias internas precisan mucha menos energía. Algunos tipos de edificios (como viviendas y almacenes) tienen unas cargas internas muy bajas y precisan calentamiento (Fig.18).

Otros edificios con cargas internas elevadas (como las fábricas) podrían incluso precisar refrigeración.

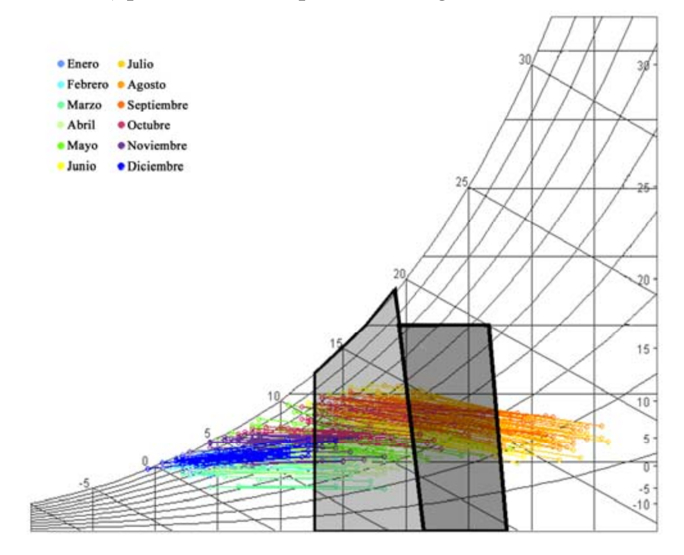


Fig. 18. Ganancias internas.

4.4.10. Ganancias solares y baja masa térmica

La eficacia de esta estrategia depende en gran medida del diseño del edificio. Si el edificio cuenta con la cantidad adecuada de ventanas orientadas al sur, gracias a la radiación solar se puede conseguir un aumento de la temperatura interior (Fig.19).

Hay que tener en cuenta que la disposición de elementos de protección solar puede llegar a impedir la incidencia solar, por lo que es un aspecto importante a tener en cuenta. Por otro lado, cuando un edificio cuenta con poca inercia térmica puede ocurrir que el espacio interior se sobrecaliente. Esta estrategia queda definida por la necesidad de radiación directa, que produce un aumento de 5,6ºC para 157,5 Wh/m^2.

El desfase de la onda térmica considerado es de 3 horas, un valor relativamente bajo, lo cual significa que ese valor de radiación debe alcanzarse con 3 horas de antelación. Se considera que a una determinada hora se encuentra en la zona de confort cuando gracias a la radiación solar se

consigue el mínimo de la temperatura de confort. El límite inferior viene dado por la temperatura exterior más baja para la cual la radiación solar producirá el mínimo de confort en el interior.

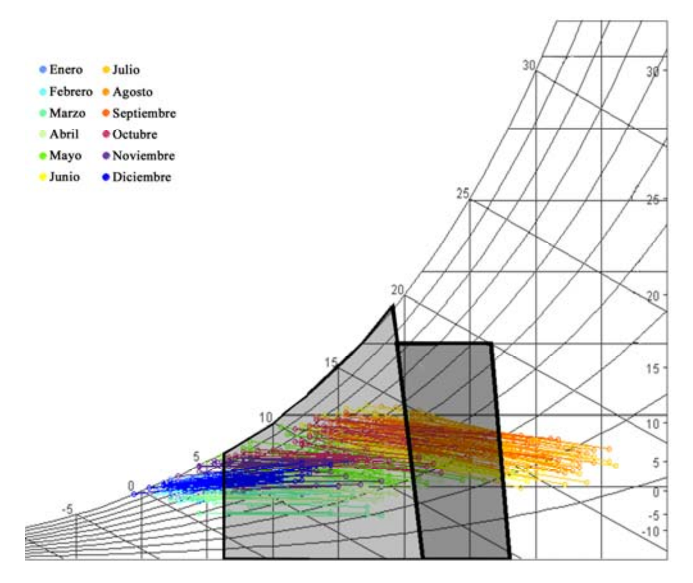


Fig. 19. Ganancias solares y baja masa térmica.

4.4.11. Ganancias solares y alta masa térmica

La eficacia de esta estrategia depende en gran medida del diseño del edificio (Fig.20). Si el edificio cuenta con la cantidad adecuada de ventanas orientadas al sur, gracias a la radiación solar se puede aumentar la temperatura interior. Cuando el edificio cuenta con alta masa térmica, la cantidad de ventanas puede ser mucho mayor sin el peligro de que se produzca un sobrecalentamiento del espacio. La masa interna en contacto con el aire interior almacenará las ganancias solares y las devolverá cuando sea necesario. Esta estrategia queda definida por la necesidad de radiación directa que produce un aumento de 5,6ºC para 315,0 Wh/m^2.

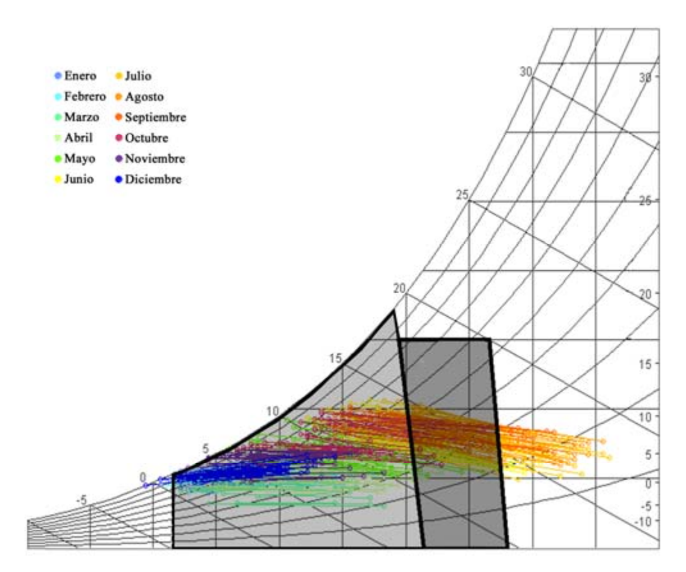


Fig. 20. Ganancias solares y alta masa térmica.

El desfase de la onda térmica considerado es de 12 horas lo cual significa que ese valor de radiación debe alcanzarse con 12 horas de antelación. En el climograma el límite inferior viene dado por la temperatura exterior más baja para la cual la radiación solar producirá el mínimo de confort interior. El límite inferior viene dado por la temperatura exterior más baja para la cual la radiación solar producirá el mínimo de confort interior.

5. Cartas solares

Los movimientos de traslación y rotación (Fig.21 y 22) característicos de la tierra tienen un efecto directo en la climatología de cada región (tal y como se ha mostrado en apartados anteriores). Del mismo modo, la relación entre el sol y cada punto geográfico varía a lo largo del año (dando lugar a las distintas estaciones) y también en un mismo día (ciclo día/noche).

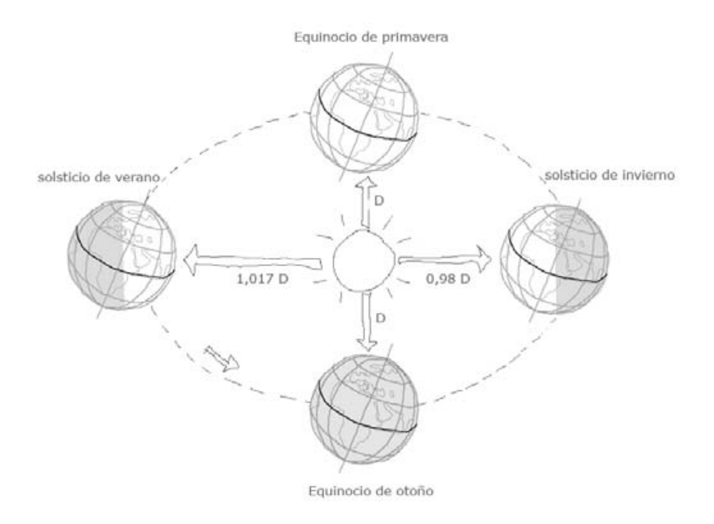


Fig. 21. Movimiento de rotación de la tierra.

En las Fig. 23, 24, 25, 26 y 27 se muestran a modo de ejemplo la representación de la trayectoria solar las ciudades: Madrid, Sevilla, San Sebastián, Oslo y Caracas. Las coordenadas solares (º) con las que se indica la posición del sol en cada momento son el azimut (grados con respecto al sur) y la altura solar (grados con respecto al plano horizontal).

El control solar es una de las estrategias pasivas más importantes y a su vez sencillas de implementar en los edificios (ver apartado *4.4.2. Sombreamiento*). Para ello es necesario contar con herramientas que recojan esta variabilidad y que faciliten el dimensionamiento de los elementos de protección solar cuando estos sean necesarios.

La herramienta de representación de la trayectoria solar más utilizada es la carta solar. Existen varias herramientas informáticas que generan cartas solares a partir de la Latitud y la Longitud correspondientes a un punto geográfico, entre ellas se encuentran CLIMATE CONSULTANT y SOLAR TOOL.

La gran ventaja de la primera es que los datos de temperatura se muestran superpuestos sobre la carta solar correspondiente, de este modo, es mucho más sencillo identificar la necesidad de elementos de sombreamiento o de exposición solar.

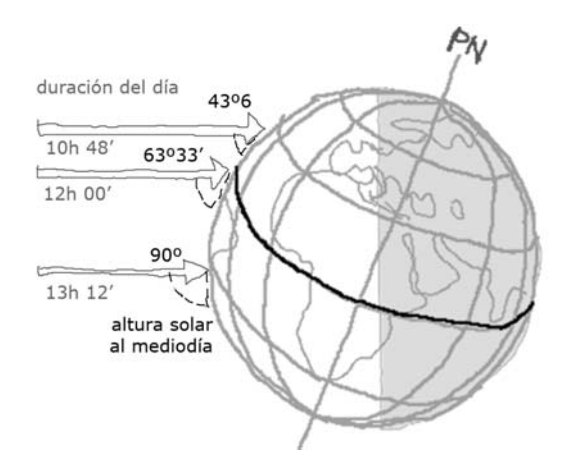


Fig. 22. Movimiento de traslación de la tierra.

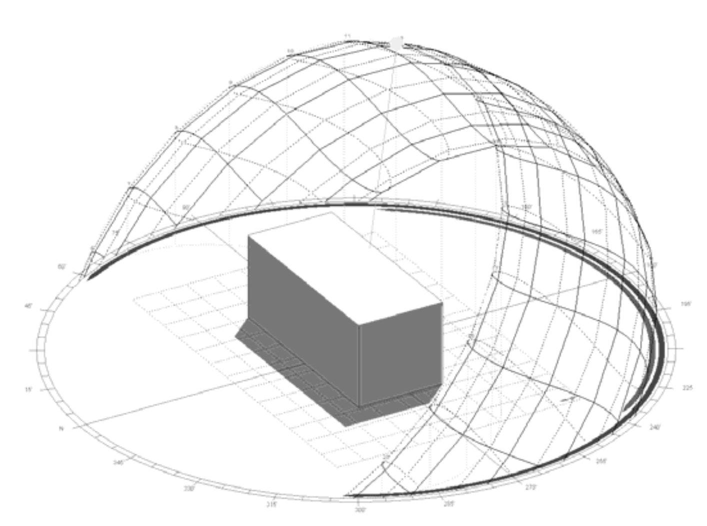


Fig. 25. Representación de la trayectoria solar en San Sebastián (ECOTECT).

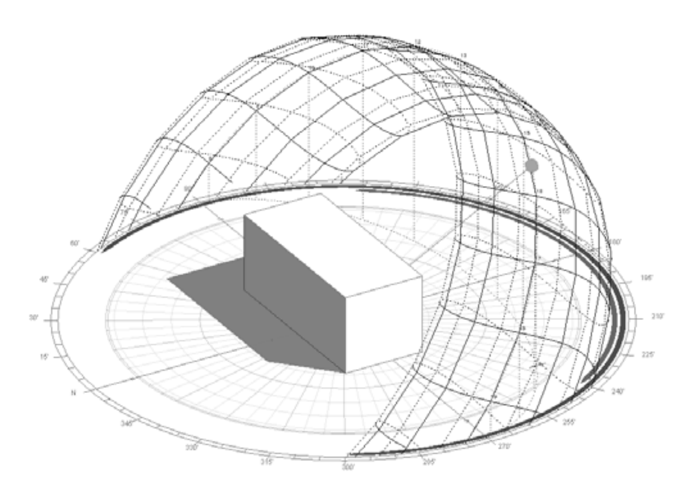


Fig. 23. Representación de la trayectoria solar en Madrid (ECOTECT).

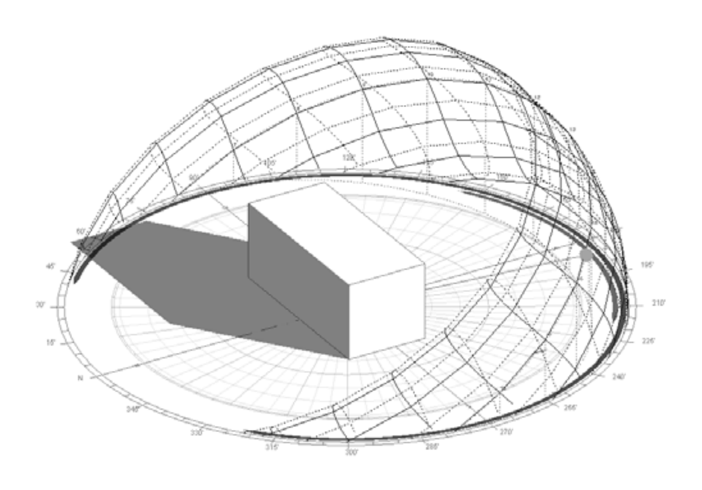


Fig. 26. Representación de la trayectoria solar en Oslo (ECOTECT).

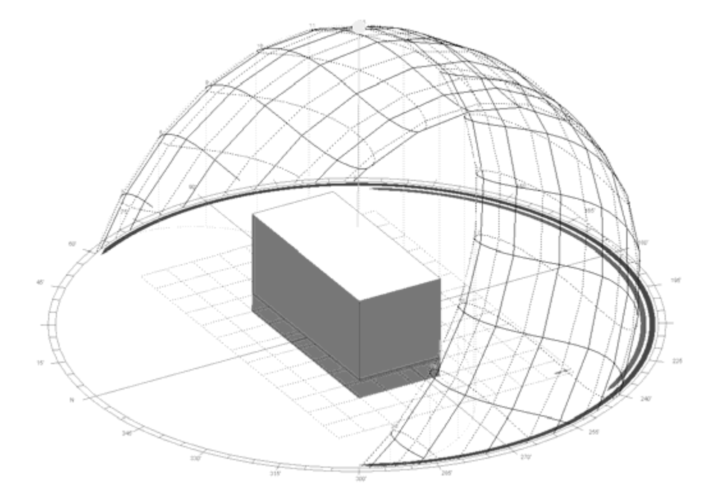


Fig. 24. Representación de la trayectoria solar en Sevilla (ECOTECT).

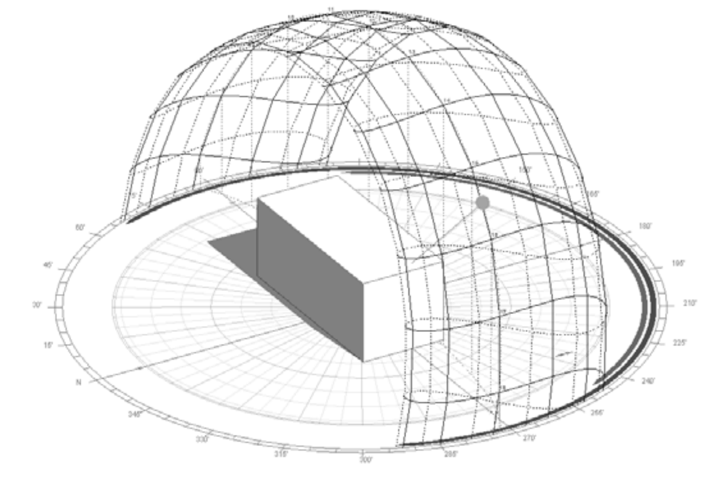


Fig. 27. Representación de la trayectoria solar en Caracas (ECOTECT).

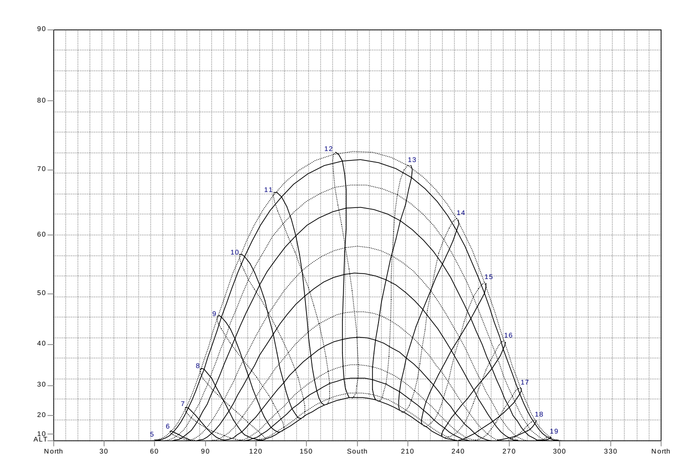


Fig. 28. Carta solar de Madrid (Latitud 40,41ºN y Longitud 3,68ºO).

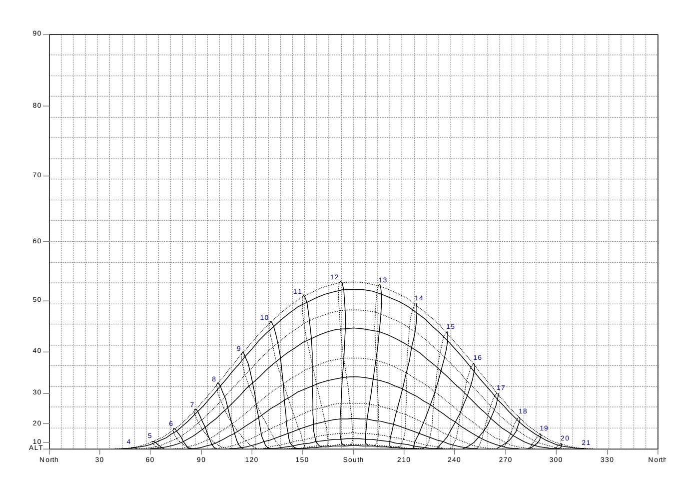


Fig. 29. Carta solar de Oslo (Latitud 59,9ºN y Longitud 10,62ºE).

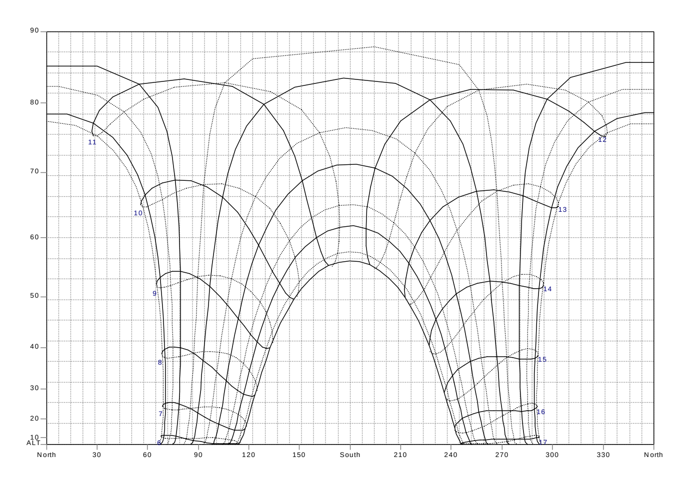


Fig. 30. Carta solar de Caracas. (Latitud 10,6ºN y Longitud 66,98ºO).

6. Casos prácticos

En este apartado se recoge el estudio bioclimático de 5 ciudades diferentes: tres de ellas situadas en el territorio peninsular (Madrid, San Sebastián y Sevilla), una situada en el norte de Europa (Oslo, Noruega) y una última situada en la zona Ecuatorial (Caracas, Venezuela).

El objetivo principal de este apartado es mostrar el manejo de las herramientas expuestas a lo largo de este capítulo de manera aplicada e identificar las estrategias bioclimáticas más adecuadas para cada caso.

Gracias al estudio comparativo entre cinco ciudades con características diferentes queda patente que no existe una solución bioclimática universal y que por lo tanto, es necesario realizar un análisis específico para cada caso.

Por otro lado, es también importante recalcar que los estudios bioclimáticos deben realizarse en las fases iniciales de un proyecto y que los climogramas y las cartas solares son las herramientas más indicadas para ello. Pero no hay que olvidar, que son instrumentos adecuados para una aproximación generalista, no así particular, las bases de datos climáticos con las que se generan suelen reflejar valores medios de largos periodos de tiempo (generalmente de 30 años).

Por lo tanto, es labor del proyectista hacer un correcto uso de las estrategias que se identifiquen y adecuarlas a las características arquitectónicas y de emplazamiento (particulares de cada proyecto).

En primer lugar es recomendable identificar (sobre todo cuando se trate de ciudades desconocidas para el proyectista) las peculiaridades climáticas generales de la ciudad en la que se situaría el edificio en cuestión. Para ello, se utiliza la clasificación climática de Köppen-Geiger (2006).

Una vez identificadas las características generales, se procede a generar el climograma (mediante el programa CLIMATE CONSULTANT) en base al modelo de confort de ASHRAE PMV en el que se pueden ajustar varios parámetros (tipo de actividad, vestimenta, etc.).

En cada climograma (en el que se muestran los datos climáticos mensuales) se han identificado las estrategias pasivas más recomendables. Cada climograma se acompaña de una serie de comentarios para facilitar su interpretación.

Una de las estrategias más importantes en el diseño bioclimático es un correcto control solar, por esta razón, el estudio bioclimático de cada ciudad se acompaña de su carta solar correspondiente (generada con CLIMATE CONSULTANT).

6.1. Análisis bioclimático de Madrid

Fig. 31. Climograma de Madrid.

Según la clasificación climática de Köppen, Madrid cuenta con un clima seco característico de las estepas frías (BSk, periodo observado: 1976 - 2000). Es habitual que en los meses de verano se superen los 35ºC durante el día y que la temperatura nocturna descienda hasta los 15ºC. En invierno, en cambio, se registran temperaturas muy bajas, incluso inferiores a los 0ºC.

6.1.1. Estrategias bioclimáticas para Madrid

Considerando las diferencias climáticas estacionales que se registran en Madrid, es necesario establecer estrategias bioclimáticas adaptadas a cada situación, considerando además, que la implementación de cada una de estas estrategias no interfiera en la efectividad de las demás (Fig.31). Por ejemplo, los elementos de sombreamiento necesarios para garantizar el confort durante los meses de verano, deberán estar correctamente diseñados para que no impidan el aprovechamiento de las ganancias solares en los meses más fríos. En el climograma basado en el modelo de confort ASHRAE Standard 55-2004 PMV (Predicted Mean Vote) se han identificado una serie de estrategias bioclimáticas que se ordenan según los diferentes meses del año.

• Meses cálidos

Durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre, es habitual que la temperatura media en Madrid se encuentre en el rango de confort aunque hay que destacar que existe un gran salto térmico entre las temperaturas máximas diurnas y mínimas nocturnas. En el mes de julio, por ejemplo, se registran de media alrededor de 18ºC de temperatura mínima y 32ºC de máxima. Por esta razón, será

necesario integrar estrategias de diseño arquitectónico en los edificios que proporcionen sombreamiento durante las horas centrales del día minimizando la exposición solar de las estancias. Así mismo, será recomendable que el edificio cuente con alta masa térmica que ayude al desfase de la onda térmica y de ventilación natural para incrementar la sensación de confort. Por último, considerando el descenso de las temperaturas durante la noche, gracias a las ganancias internas se podrán conseguir condiciones de confort durante las horas más frías.

• *Meses fríos*

En los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, es frecuente que en Madrid no se consigan condiciones de confort ni durante el día ni la noche. Por lo tanto, será aconsejable que el edificio esté diseñado para optimizar las ganancias solares mediante un correcto diseño, orientación y dimensionamiento de los huecos en fachada. Será además imprescindible la puesta en marcha de un sistema de calefacción para combatir las bajas temperaturas invernales cercanas a los 0ºC, incluso rebasándolas en muchas ocasiones.

• *Meses intermedios*

En las horas centrales del día de los meses de abril, mayo y octubre se consiguen temperaturas de confort. Durante el resto de las horas, en cambio, es habitual que no se alcancen estas condiciones, por lo que el aprovechamiento de las ganancias internas, acompañada de masa térmica serán las estrategias más importantes para alcanzar ese objetivo. Para combatir las bajas temperaturas nocturnas, será imprescindible la puesta en marcha de un sistema de calefacción.

6.1.2. Carta solar de Madrid

En la siguiente carta solar correspondiente al periodo junio/diciembre se muestran superpuestas las temperaturas registradas (cada 15 minutos) en Madrid. En ella queda patente que dependiendo de la orientación la necesidad de una protección solar tendrá mayor o menor importancia.
Entre todas las orientaciones, la oeste es la más castigada ya que además de las altas temperaturas (> 27ºC) que se registran en las tardes de los meses de junio, julio y agosto, recibe radiación solar directa (Fig.32).

A la hora de dimensionar los elementos de protección solar hay que tener en cuenta que la altura solar es muy baja las tardes de verano, por lo que sería necesario emplear elementos de carácter vertical. Por otro lado, hay que tener en cuenta que los elementos de sombreamiento no deben impedir la incidencia solar en los meses más fríos (< 20ºC), por lo que el uso de sistemas móviles sería la opción más adecuada.

El control solar es una de las estrategias pasivas más importantes y sencillas de implantar a la hora de diseñar un edificio situado en Madrid, pero a su vez, su geometría deberá estar proyectada para no impedir la exposición solar durante los meses más fríos.

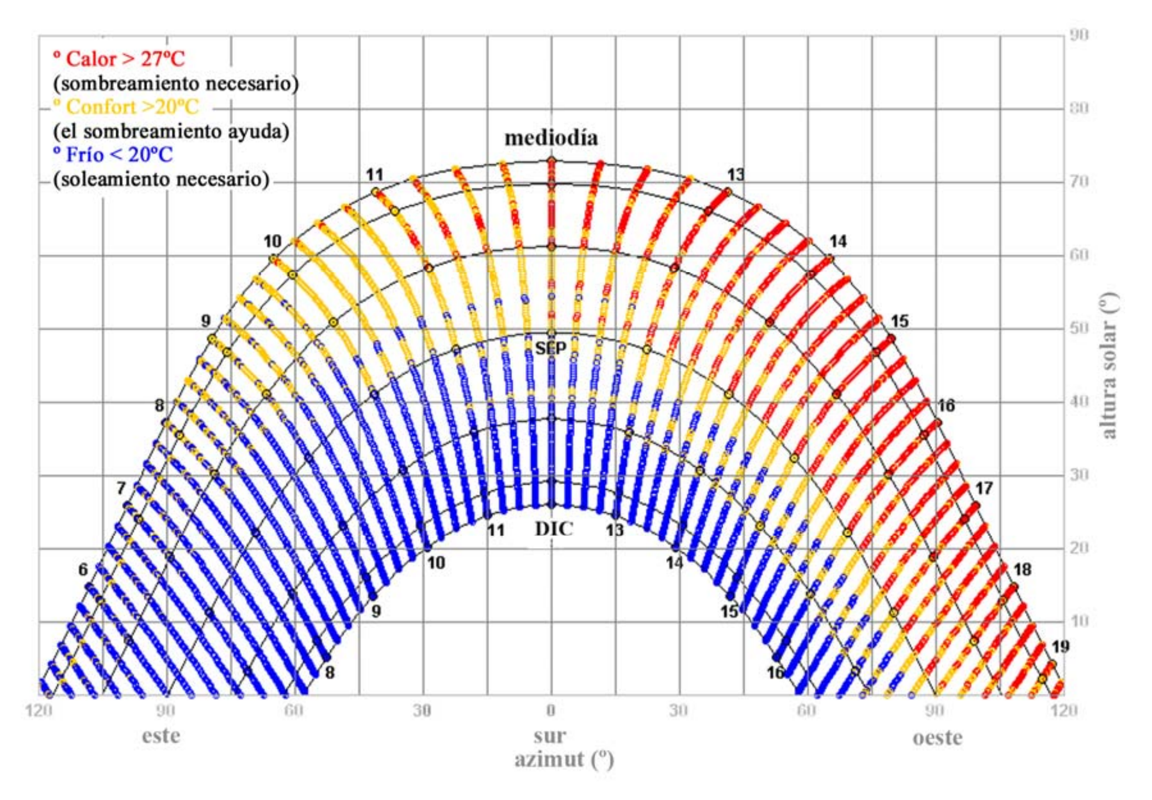


Fig. 32. Carta solar de Madrid.

6.2. Análisis bioclimático de Sevilla

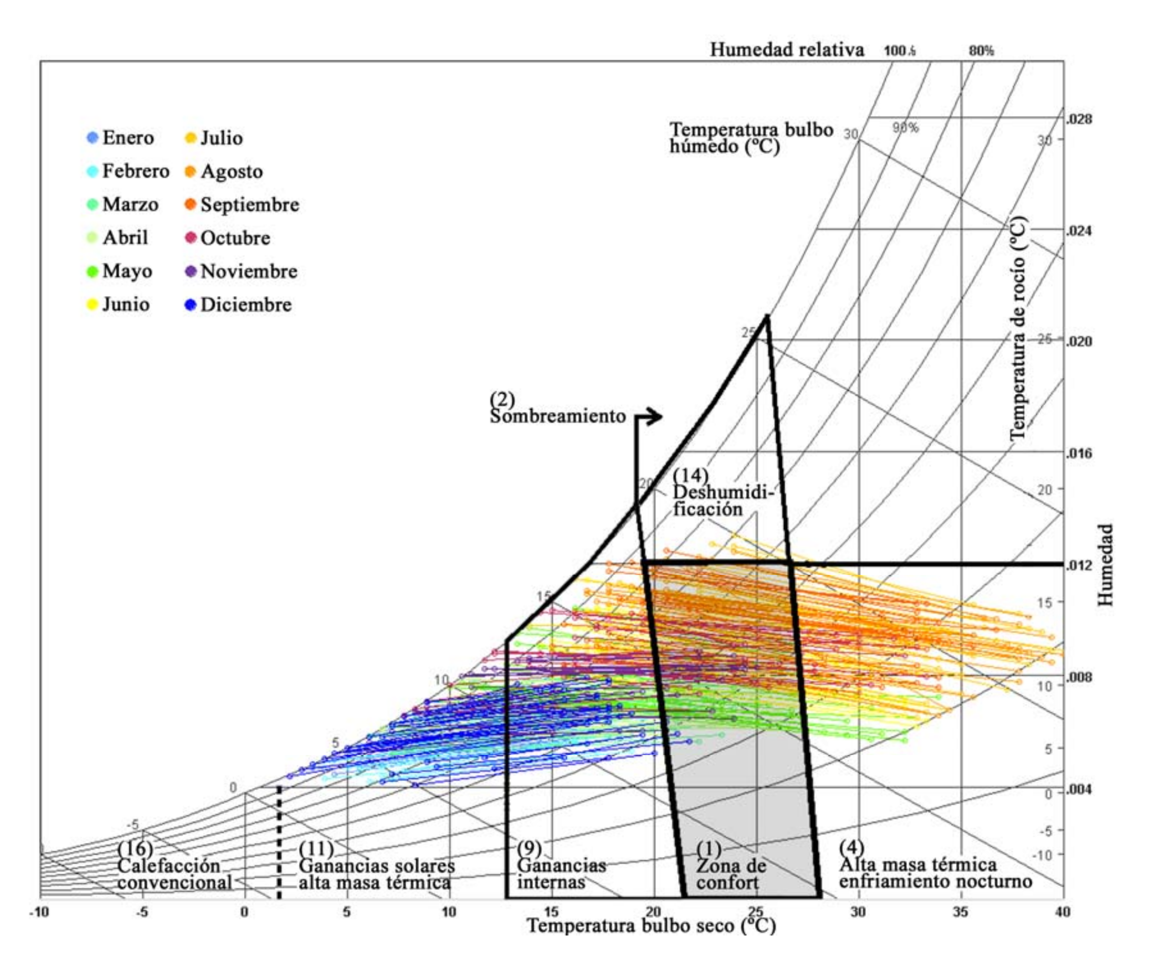


Fig. 33. Climograma de Sevilla.

Según la clasificación climática de Köppen, Sevilla cuenta con un clima templado con verano seco y caluroso (Csa, periodo observado: 1976 - 2000). Es habitual que en los meses de verano se alcancen los 40ºC durante el día y que la temperatura nocturna descienda hasta los 20 - 25ºC. Los inviernos no son especialmente fríos, en pocas ocasiones se registran temperaturas inferiores a los 5ºC.

6.2.1. Estrategias bioclimáticas para Sevilla

Considerando las diferencias climáticas estacionales que se registran en Sevilla, es necesario establecer estrategias bioclimáticas adaptadas a cada situación, considerando además, que la implementación de cada una de estas estrategias no interfiera en la efectividad de las demás (Fig.33). Por ejemplo, los elementos de sombreamiento necesarios para garantizar el confort durante los meses de verano, deberán estar correctamente diseñados para que no impidan el aprovechamiento de las ganancias solares en los meses más fríos. En el climograma se han identificado una serie de estrategias bioclimáticas que se ordenan según los diferentes meses del año:

• *Meses cálidos*

Durante los meses de junio y septiembre, es habitual que la temperatura media en Sevilla se encuentre en el rango de confort aunque hay que destacar que existe un gran salto térmico entre las temperaturas máximas diurnas y mínimas nocturnas. En el mes de junio, por ejemplo, se registran de media alrededor de 17ºC de temperatura mínima y 32ºC de máxima. Por esta razón, será necesario integrar estrategias de diseño arquitectónico en el edificio que proporcionen sombreamiento durante las horas centrales del día minimizando la exposición solar de las estancias. Así mismo, será recomendable que el edificio cuente con alta masa térmica que además incorpore un sistema de aprovechamiento de la ventilación nocturna para que ayude al desfase de la onda térmica. Por último, considerando el descenso de las temperaturas durante la noche, gracias a las ganancias internas se podrán conseguir condiciones de confort durante las horas más frías. En los meses más calurosos (julio y agosto) ocurre algo similar, la temperatura media aproximada en Sevilla es en torno a 27ºC y la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas es aún más pronunciada que en los meses anteriores. Por

ejemplo, en julio se registran de media alrededor de 20ºC de temperatura mínima y 36 ºC de máxima. Por lo tanto, además de las estrategias anteriormente definidas para los meses de junio y septiembre, será necesario incorporar un sistema de deshumidificación ya que la humedad relativa media en esos meses es en torno al 80%.

• *Meses fríos*

En los meses de enero, febrero y diciembre, es frecuente que en Sevilla no se consigan condiciones de confort ni durante el día ni durante la noche. En el mes de enero, por ejemplo, se registran de media aproximadamente 7ºC de temperatura mínima y 17ºC de máxima. Por lo tanto, será aconsejable que el edificio esté diseñado para optimizar las ganancias solares mediante un correcto diseño, orientación y dimensionamiento de los huecos en fachada. Será además imprescindible la puesta en marcha de un sistema de calefacción para combatir las temperaturas invernales en torno a los 7-8ºC.

• *Meses intermedios*

En las horas centrales del día de los meses de marzo, abril y noviembre se consiguen temperaturas de confort. Durante el resto de las horas, en cambio, es habitual que no se alcancen estas condiciones por lo que el aprovechamiento de las ganancias internas, acompañada de alta masa térmica serán las estrategias más importantes para alcanzar ese objetivo. Para combatir las bajas temperaturas nocturnas, será imprescindible la puesta en marcha de un sistema de calefacción. En las horas centrales de los meses de octubre y mayo se consiguen temperaturas de confort con una media diaria cercana a los 20ºC.

La temperatura mínima es en torno a los 13ºC. Las estrategias más importantes serán el aprovechamiento de las ganancias internas y las ganancias solares y masa térmica para desfasar la onda térmica.

6.2.2. Carta solar de Sevilla

En la siguiente carta solar correspondiente al periodo junio/diciembre se muestran superpuestas las temperaturas registradas (cada 15 minutos) en Sevilla, en ella queda patente la necesidad de emplear elementos de protección solar. Entre todas las orientaciones, la oeste es la más castigada ya que además de las altas temperaturas (> 27ºC) que se registran en las tardes de los meses de junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre, recibe radiación solar directa (Fig.34). A la hora de dimensionar los elementos de protección solar hay que tener en cuenta que la altura solar es muy baja las tardes de verano, por lo que sería necesario emplear elementos de carácter vertical. Durante los meses de junio, julio y agosto las fachadas con orientación sur también precisan protección solar, esta es más sencilla de dimensionar ya que la altura solar es superior a los 70º, por lo que un voladizo de poca profundidad sería suficiente.

Por último, es importante tener en cuenta que durante los meses de junio, julio y agosto, la incidencia solar directa en fachadas con orientación este puede producir problemas de sobrecalentamiento en el interior de los edificios antes de que estos sean ocupados, como es el caso de las oficinas. El control solar es una de las estrategias pasivas más importantes y sencillas de implantar a la hora de diseñar un edificio situado en Sevilla.

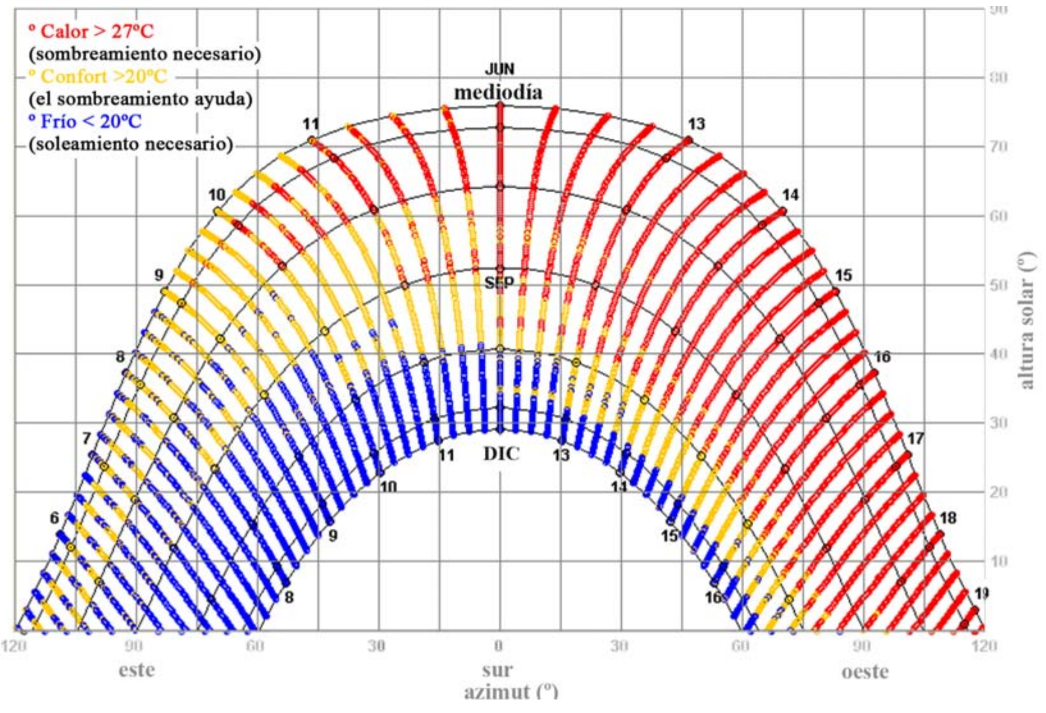


Fig. 34. Carta solar de Sevilla.

6.3. Análisis bioclimático de San Sebastián

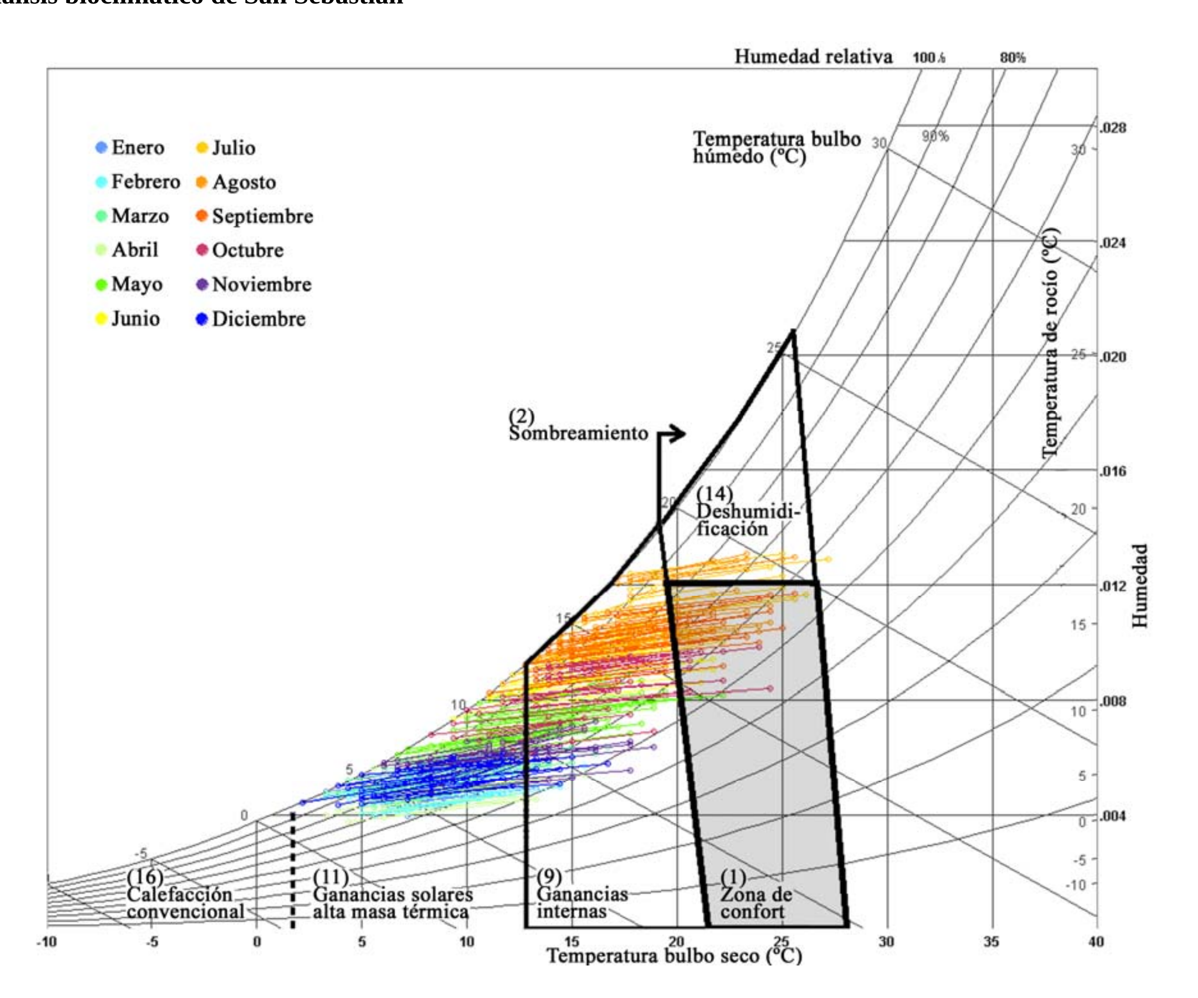


Fig. 35. Climograma de San Sebastián.

Según la clasificación climática de Köppen, San Sebastián cuenta con un clima templado sin estación seca con verano templado (Cfb, periodo observado: 1976 - 2000). Es habitual que en los meses de verano no se superen los 22ºC durante el día y que la temperatura nocturna no descienda de los 17ºC. Los inviernos no son especialmente fríos, en pocas ocasiones se registran temperaturas inferiores a los 7ºC. La humedad relativa, en cambio, se acerca de media al 80% influyendo negativamente en la sensación de confort, sobre todo en los meses de verano.

6.3.1. Estrategias bioclimáticas para San Sebastián

Aunque las diferencias climáticas estacionales no son muy acusadas en San Sebastián, es necesario establecer estrategias bioclimáticas adaptadas a cada situación, considerando además, que la implementación de cada una de estas estrategias no interfiera en la efectividad de las demás (Fig.35). Por ejemplo, los elementos de sombreamiento necesarios para garantizar el confort durante los meses de verano, deberán estar correctamente diseñados para que no impidan el aprovechamiento de las ganancias solares en los meses más fríos. En el siguiente climograma se han identificado una serie de estrategias bioclimáticas que se ordenan según los diferentes meses del año:

• *Meses intermedios*

En gran parte de las horas centrales del día de los meses de mayo, junio, octubre se consiguen temperaturas de confort. Durante el resto de las horas, en cambio, es habitual que no se alcancen estas condiciones por lo que el aprovechamiento de las ganancias internas es fundamental. Para combatir las bajas temperaturas nocturnas, será imprescindible la puesta en marcha ocasional de un sistema de calefacción.

• *Meses cálidos*

Durante los meses de julio, agosto y septiembre, aunque en las horas centrales se alcanzan temperaturas dentro del rango de confort, la temperatura media diaria es en torno a los 18ºC. El salto térmico durante el día y la noche no es demasiado pronunciado, por ejemplo, en el mes de julio se

registran de media alrededor de 17ºC de temperatura mínima y 22ºC de máxima. La humedad media varía de 85% de máxima a 68% de mínima.

Por esta razón, será necesario integrar estrategias de diseño arquitectónico en los edificios que proporcionen sombreamiento. Considerando el descenso de las temperaturas durante la noche, gracias a las ganancias internas acumuladas se podrán conseguir condiciones de confort durante las horas más frías. Será necesario incorporar un sistema de deshumidificación ya que la humedad relativa media en esos meses es bastante elevada.

• *Meses fríos*

En los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril no se consiguen condiciones de confort ni durante el día ni durante la noche. Por lo tanto, será aconsejable que el edificio esté diseñado para aprovechar las ganancias solares mediante una correcta orientación y dimensionamiento de los huecos en fachada además de aprovechar las ganancias internas.
Será además imprescindible la puesta en marcha de un sistema de calefacción para combatir las temperaturas invernales en torno a los 7-8ºC.

6.3.2. Carta solar de San Sebastián

En la siguiente carta solar correspondiente al periodo junio/diciembre se muestran superpuestas las temperaturas registradas (cada 15 minutos) en San Sebastián. En ella queda patente que aunque en determinados meses como julio y agosto es recomendable la utilización de elementos de sombreamiento, el aprovechamiento de las ganancias solares es mucho más importante si se quieren garantizar condiciones de confort (Fig.36).

Analizando las distintas orientaciones, la oeste es la más castigada ya que además de la temperatura exterior superior a los 20ºC (en las tardes de los meses julio y agosto), es la que recibe radiación solar directa. Considerando que los elementos de sombreamiento no deben impedir la incidencia solar, el uso de sistemas móviles sería la opción más adecuada.

El aprovechamiento de las ganancias solares es una de las estrategias pasivas más importantes y sencillas de implantar a la hora de diseñar un edificio situado en San Sebastián.

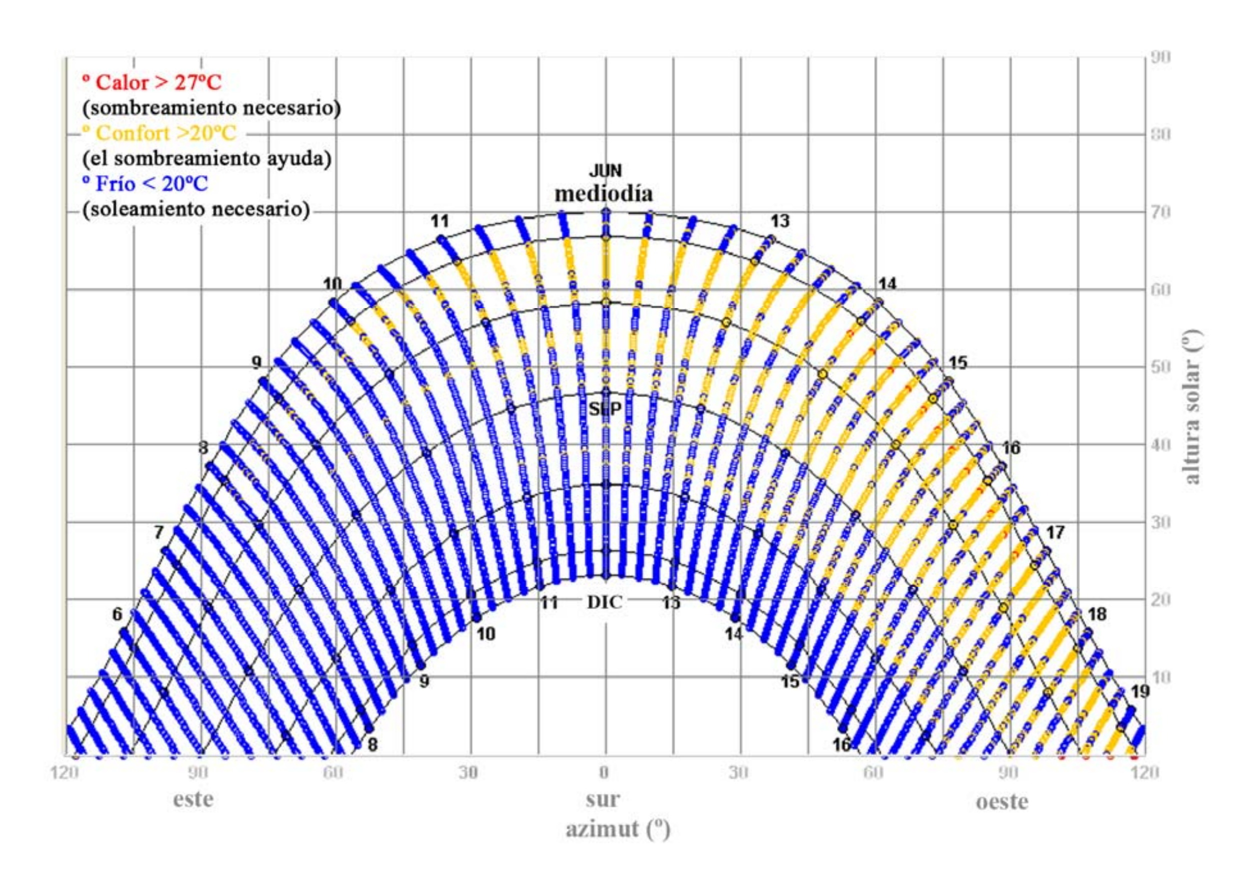


Fig. 36. Carta solar de San Sebastián.

6.4. Análisis bioclimático de Oslo (Noruega)

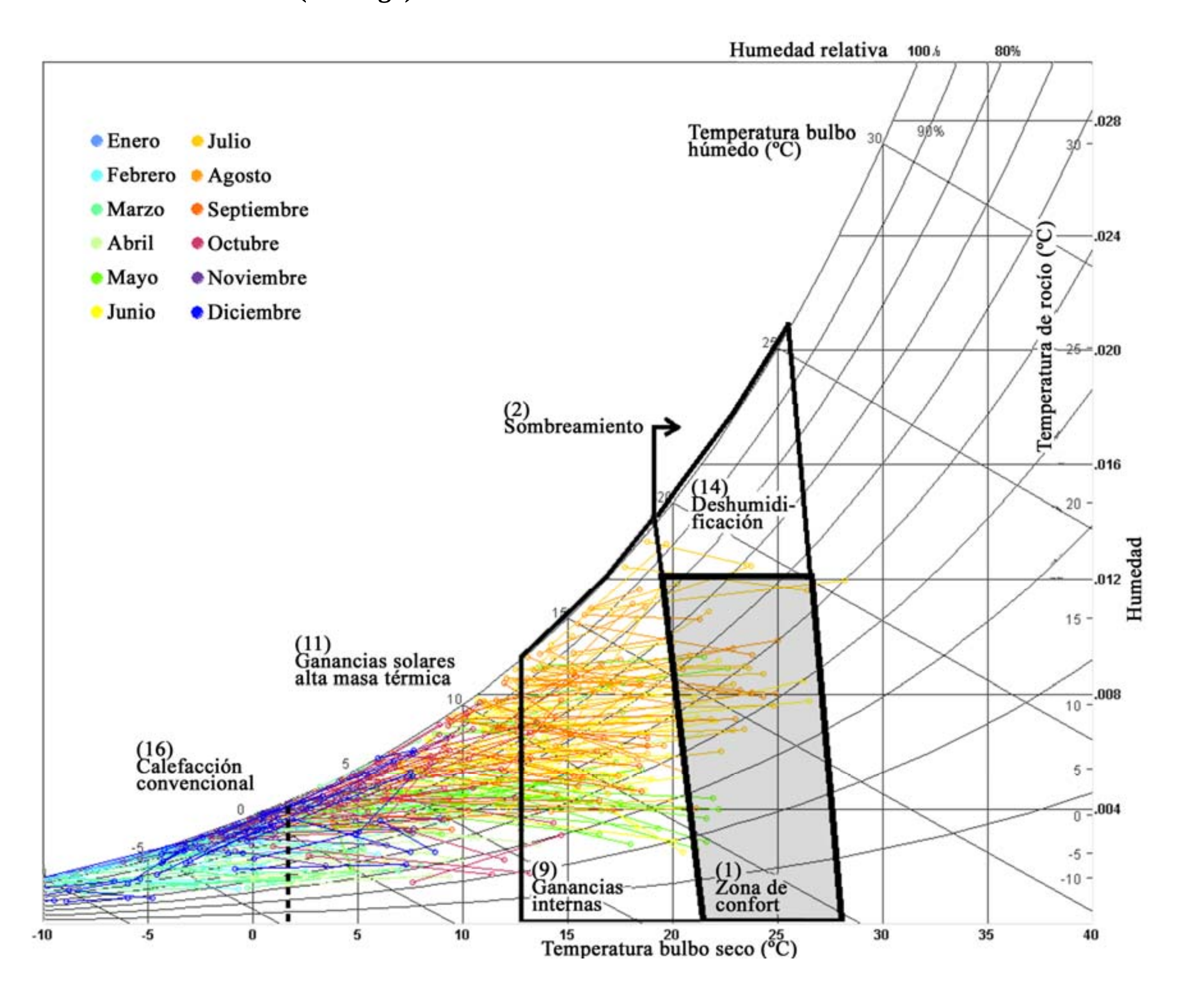


Fig. 37. Climograma de Oslo.

Según la clasificación climática de Köppen, Oslo cuenta con un clima frío sin estación seca y verano templado (Dfb, periodo observado: 1976 - 2000). Es habitual que en los meses de verano (julio y agosto) no se superen los 22ºC durante el día y que la temperatura nocturna no descienda de los 12ºC. El periodo de invierno es largo (de noviembre a marzo) y especialmente frío y en muchas ocasiones se registran temperaturas inferiores a los -5ºC.

6.4.1. Estrategias bioclimáticas para Oslo

Aunque las diferencias climáticas estacionales no son muy acusadas en Oslo, exceptuando los meses de julio y agosto, es necesario establecer estrategias bioclimáticas adaptadas a cada situación, considerando además, que la implementación de cada una de estas estrategias no interfiera en la efectividad de las demás (Fig.37). Por ejemplo, los elementos de sombreamiento necesarios para garantizar el confort durante algunos momentos de los meses de verano, deberán estar correctamente diseñados para que no impidan el aprovechamiento de las ganancias solares en el resto de los meses.

• *Meses fríos*

Desde noviembre a abril no se consiguen condiciones de confort ni durante el día ni durante la noche, registrándose valores medios inferiores a los 0ºC y sin ni siquiera superar los 5ºC en las horas centrales del día. En estas circunstancias será necesario que el edificio esté correctamente aislado y el accionamiento de un sistema de calefacción para combatir tales temperaturas invernales. En los meses de abril y octubre, tampoco se alcanza a superar los 10ºC.

• *Meses intermedios*

Mayo y septiembre pueden considerarse meses intermedios en Oslo con temperaturas medias diarias en torno a los 12ºC, y raramente superando los 15ºC como temperatura máxima. En gran parte de las horas centrales de mayo gracias a las ganancias internas y ganancias solares se podrá corregir el discomfort en el interior de los edificios. Para combatir las bajas temperaturas nocturnas, será imprescindible la puesta en marcha ocasional de un sistema de calefacción.

• *Meses cálidos*

Durante los meses de junio, julio y agosto en parte de las horas centrales del día se alcanzan condiciones de confort con una temperatura media diaria de 17,4ºC. La temperatura varía de 23,4ºC a 8,1ºC, por lo que hay un gran descenso por las noches. El aprovechamiento de las ganancias internas y las ganancias solares serán fundamentales. Además, será necesaria la protección solar o deshumidificación ya que la humedad relativa es elevada.

6.1.2. Carta solar de Oslo

En la siguiente carta solar correspondiente al periodo junio/diciembre se muestran superpuestas las temperaturas registradas (cada 15 minutos) en Oslo, en ella queda patente que aunque en determinados momentos de los meses de julio y agosto es recomendable la utilización de elementos de sombreamiento, el aprovechamiento de las ganancias solares es mucho más importante si se quieren garantizar condiciones de confort (Fig.38).

Analizando las distintas orientaciones, la oeste podría considerarse como la más castigada ya que además de la temperatura exterior en torno a los 20ºC (en las tardes de los meses de julio y agosto), es la que recibe radiación solar directa. Considerando que los elementos de sombreamiento no deben impedir la incidencia solar, el uso de sistemas móviles sería la opción más adecuada.

Un correcto aislamiento del edificio que además pueda aprovechar las ganancias solares serían las estrategias pasivas más importantes de implantar a la hora de diseñar un edificio situado en Oslo.

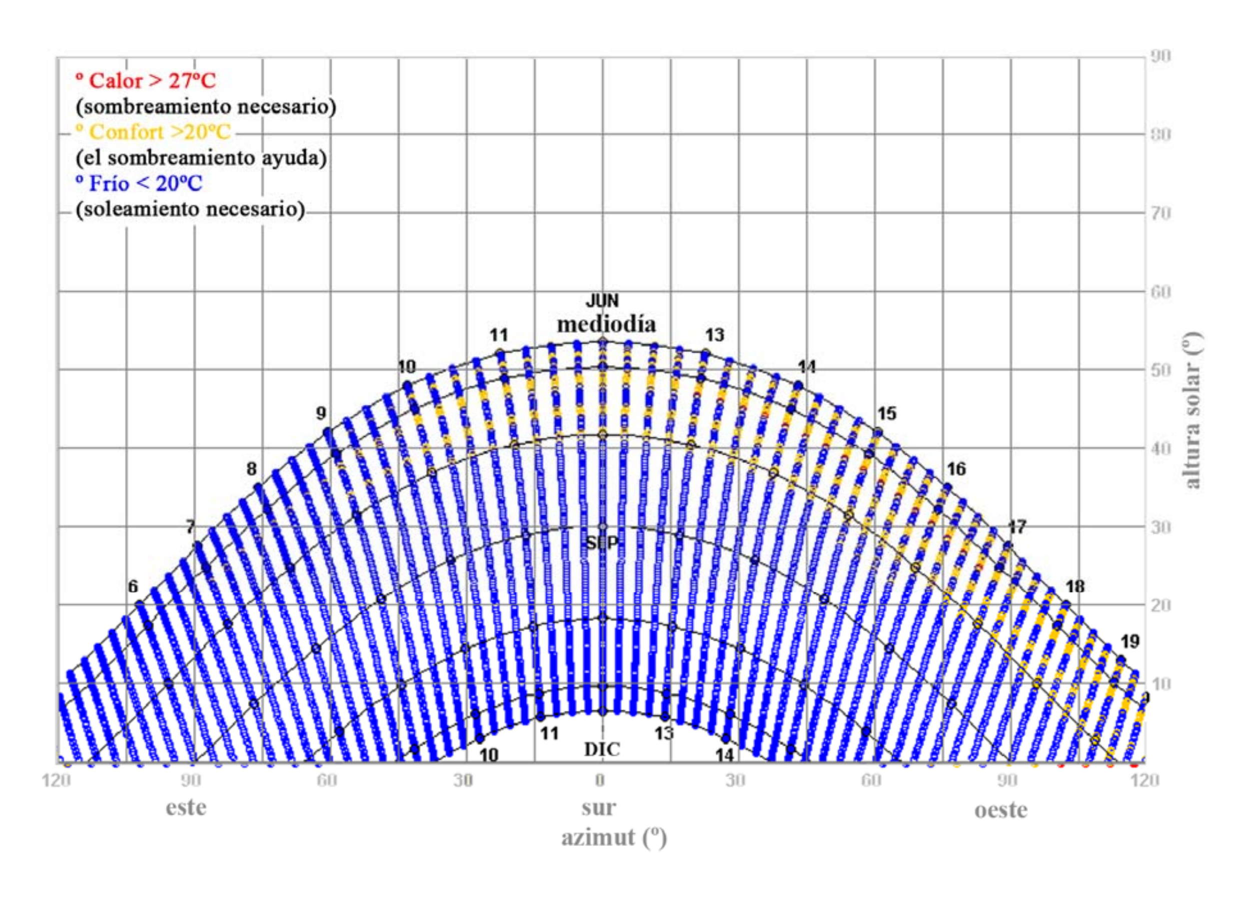


Fig. 38. Carta solar de Oslo.

6.5. Análisis bioclimático de Caracas (Venezuela)

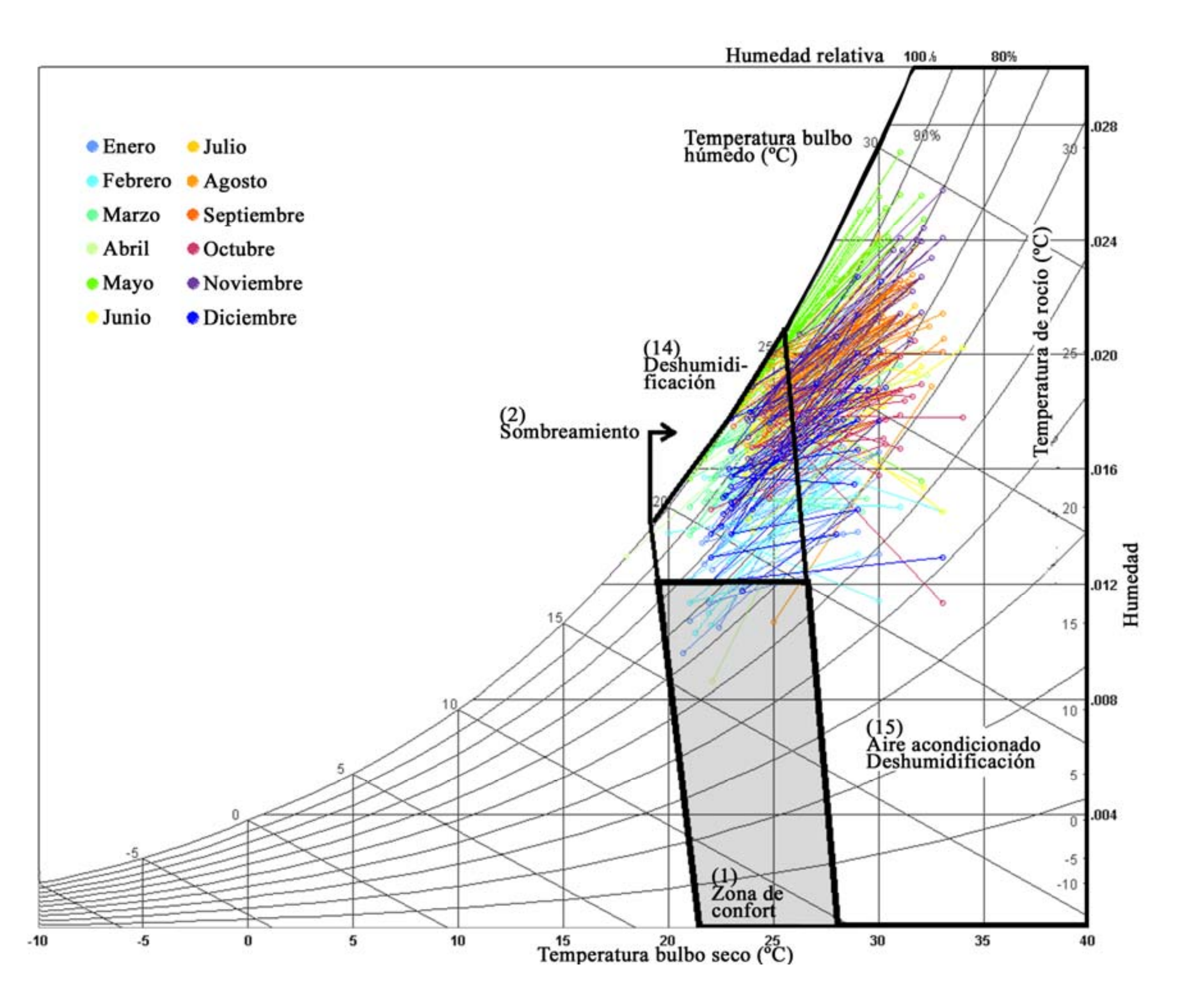


Fig. 39. Climograma de Caracas.

Según la clasificación climática de Köppen, Caracas cuenta con un clima seco característico de las estepas frías (BSk, periodo observado: 1976- 2000). Es habitual que en los meses de verano se superen los 35ºC durante el día y que la temperatura nocturna descienda hasta los 15ºC. En invierno, en cambio, se registran temperaturas muy bajas incluso inferiores a los 0ºC.

6.5.1. Estrategias bioclimáticas para Caracas

Las diferencias climáticas estacionales no son muy acusadas en Caracas, por lo que se puede establecer una estación cálida con temperaturas medias diarias en torno a los 25ºC (desde diciembre a abril) y otra calurosa con temperaturas medias diarias en torno a los 28ºC (desde mayo a noviembre) (Fig.39).

En el siguiente climograma basado en el modelo de confort ASHRAE Standard 55-2004 PMV (Predicted Mean Vote) se han identificado una serie de estrategias bioclimáticas que se mencionan a continuación.

• *Meses calurosos*

Desde mayo a noviembre, la temperatura media en Caracas es superior al rango de confort. La variación día noche no es muy acentuada y nunca baja de los 20ºC. En agosto, es habitual que se registren temperaturas medias máximas superiores a los 30ºC. Considerando la elevada humedad relativa que se registra, además de una eficaz protección solar sería necesaria la deshumidificación y en determinados momentos, sería inevitable la puesta en marcha de aire acondicionado.

• *Meses cálidos*

Desde diciembre a abril, es habitual que en Caracas baje la temperatura en comparación con los datos registrados para los meses calurosos. Aún así, un sistema de protección solar y deshumidificación serían necesarios. En determinados momentos de los meses de enero y febrero, esas temperaturas podrían incluso estar en el rango de confort.

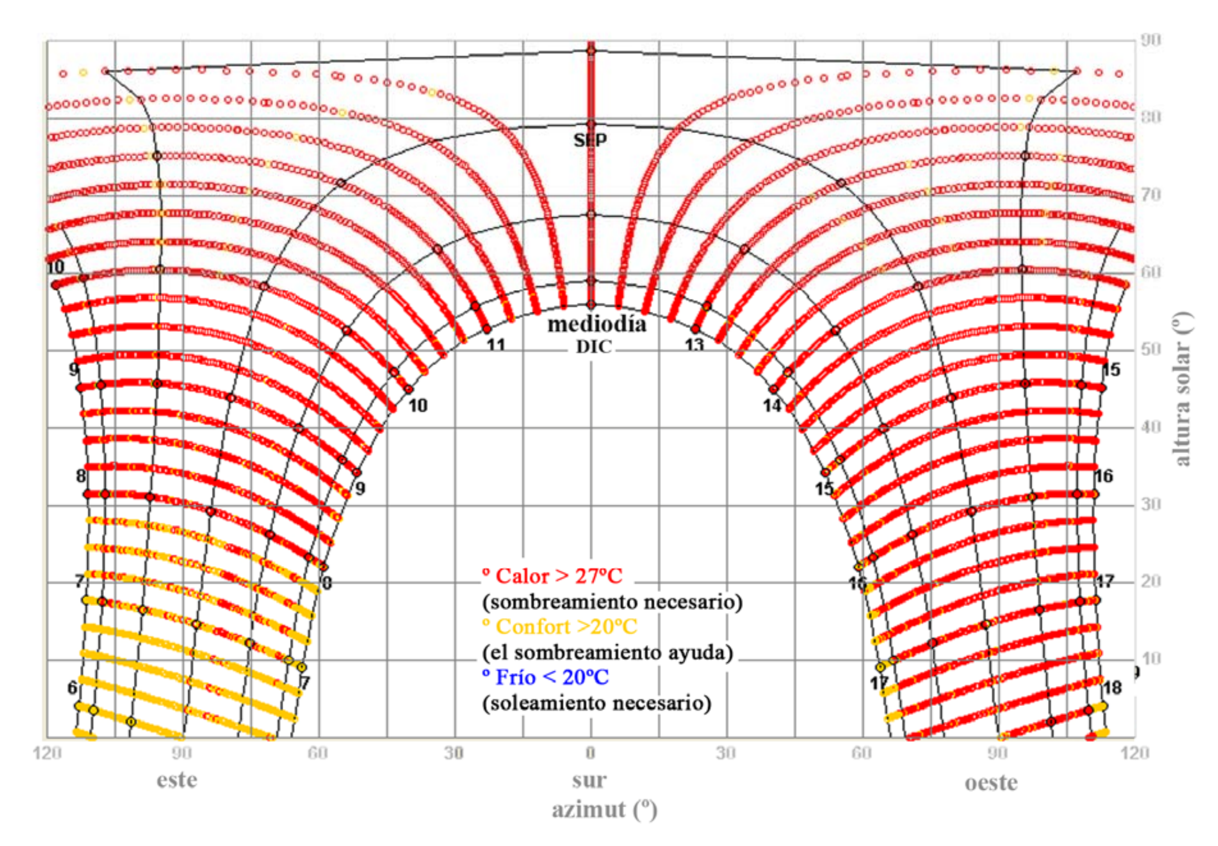


Fig. 40. Carta solar de Caracas.

6.5.2. Carta solar de Caracas

En la carta solar correspondiente al periodo junio/diciembre se muestran superpuestas las temperaturas registradas (cada 15 minutos) en Caracas. En ella queda patente la necesidad de incorporar elementos de protección solar para alcanzar las condiciones de confort.

Analizando las distintas orientaciones, la oeste podría considerarse como la más castigada ya que además de la temperatura exterior superior a los 27ºC, es la que recibe radiación solar directa. Por otro lado, considerando que la altura solar es muy elevada en el caso de Caracas, la cubierta de los edificios también debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar la incidencia solar (Fig.40).

En general, un edificio situado en Caracas debe estar protegido del sol durante todo el año.

El peso de cada estrategia orientada a reducir la demanda energética tiene que variar y adaptarse a los parámetros climáticos locales.

El uso de climogramas permite la definición de estrategias, mayoritariamente pasivas, para alcanzar condiciones de confort según los diferentes modelos explicados.

Por otro lado, es importante garantizar que la definición de determinadas estrategias no interfiera en la eficacia de otras, por ejemplo, cuando los elementos de sombreamiento impiden el aprovechamiento de la radiación solar cuando ésta sea necesaria.

El uso de estas herramientas, tal y como se explica en este capítulo, debe realizarse en la fases preliminares de análisis de un proyecto arquitectónico y considerarse como instrumentos de apoyo a la toma de decisiones.

7. Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado la potencialidad de los climogramas como herramientas que facilitan la toma de decisiones a la hora de definir estrategias de diseño en las fases iniciales del proyecto arquitectónico. Estas estrategias estarán orientadas a conseguir condiciones de confort higrotérmico en el interior de los edificios reduciendo, al mismo tiempo, su consumo energético.

Glosario

Carta solar: gráfico que representa la trayectoria del sol durante todo el año para un determinado punto geográfico.
Climograma: herramienta de análisis bioclimático en las que se establecen estrategias orientadas a conseguir condiciones de confort higrotérmico en los edificios.
Confort higrotérmico: sensación de bienestar físico y mental asociado a una condición de neutralidad con respecto al ambiente circundante.

Estrategias bioclimáticas: soluciones arquitectónicas orientadas al aprovechamiento de los parámetros climáticos del entorno para reducir la demanda energética de los edificios.
PMV (Predicted Mean Vote): valor medio de los votos de la sensación térmica emitidos por el número de personas expuestas en las mismas condiciones ambientales.
PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied): Porcentaje previsto de personas que pueden estar descontentas por sentir el ambiente demasiado caliente o demasiado frío.
Zona climática: región geográfica en la que se recogen parámetros climáticos similares.

Bibliografía

[1] W. Köppen, Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet, Meteorol Z. 1, 215-226, 1884.
[2] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130, 2006.
[3] Ministerio del Medio Ambiente. "Análisis climatológico español. Cambio climático". Quinta comunicación nacional de España. Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *http://www.mma.es/*.
[4] O. Fanger, Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw-Hill, EU, 1970.
[5] O. Fanger, Thermal comfort. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company, 1982.
[6] O. Fanger, Thermal comfort in the future-Excellence and expectation, en Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Conference Proceedings. Cumberland Lodge, Windsor, UK, 2001.
[7] O. Fanger, y J. Toftum, Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates, en Energy and Buildings, núm. 34, 2002.
[8] F. C. Houghton,y W. E. Miller, Effective Temperature with Clothing. American Society of Heating and Ventilation Engineers, en Transactions, vol. 29, ASHRAE Research Report núm. 69, 1925.
[9] R. R. Gonzalez, Y. Nishi y A. P. Gagge, Experimental evaluation of standard effective temperature a new biometeorological index of man's thermal discomfort", en International Journal of Biometeorology, Volume 18, Issue 1.
[10] ASHRAE HANDBOOK, "Fundamentals SI Edition 1993. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc." 1791. Tullie Circle, N.E., Atlanta, USA.
[11] G. Brager y R. De Dear, Climate, Comfort & Natural Ventilation: A new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55, en Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century, Conference Proceedings. Cumberland Lodge, Windsor, UK, 2001.
[12] M. Humphreys, Outdoor temperatures and comfort indoors, Building Research and Practice, vol. 6 (2), 1978.
[13] G. Brager, y R. De Dear, Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Buildings, num. 27, 1998.
[14] ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
[15] ASHRAE Handbook, Fundamentals, Atlanta, Tullie Circle, 1985.
[16] ANSI-ASHRAE 55-1992: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, EU, 1992.
[17] ASHRAE handbook fundamentals. Atlanta, EU, 2001.
[18] ANSI-ASHRAE, 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, EU, 2004.
[19] G. Brager,y R. De Dear, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55, en Energy and Buildings, 34, 6, 2002.
[20] G. Brager, G. Paliaga,y R. J. De Dear, Operable windows, personal control and occupant comfort, en ASHRAE Trans., vol. 110(2), 2004.
[21] J. Evans, Evaluating comfort with varying temperatures: a graphic design tool, Energy and Buildings, 35, 2003.
[22] Gómez-Azpeitia, G. y Ruiz Torres, P. "Determinación de la amplitud del rango de confort térmico preferente para las personas que habitan en clima tropical sub-húmedo. Caso: Ciudad de Colima. Reporte técnico final cgic-400/06-A-000". FRABRA. Universidad de Colima, México, 2007.

Materiales de Cambio de Fase para almacenamiento térmico y su empleo en edificación

Phase Change Materials for Thermal Energy Storage and their Use in Buildings

Ana García-Romero [a*], Gonzalo Diarce [b]

[a]*Dra. en Ciencias,* [b] *Ingeniero Químico. ENEDI Research Group. Departamento de Ingeniería Minera, Metalurgia y Ciencia de Materiales. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Minas y de Obras Públicas. Universidad del País Vasco*

Resumen

Una de las áreas de creciente interés social, económico y ecológico es el estudio y desarrollo de nuevos sistemas constructivos que permitan almacenar la energía de manera eficiente, reduciendo de este modo el gasto energético, el consumo de energías fósiles y la contaminación asociada. Los materiales de cambio de fase son un modo de almacenar energía térmica en forma de calor latente de fusión. Su empleo como método de almacenamiento térmico en edificación es una de las alternativas que se encuentra en desarrollo en el momento actual. Los materiales de cambio de fase, más conocidos como *PCM*s, pueden ser incorporados en distintos tipos de soluciones constructivas y en instalaciones auxiliares. Existen varios aspectos técnicos que en el momento presente limitan su empleo, así como aspectos económicos. En el presente capítulo repasaremos el estado actual de desarrollo de esta tecnología para la mejora de la eficiencia energética de los edificios.

Palabras clave: Materiales de Cambio de Fase, PCMs, Almacenamiento Térmico, Edificación

Abstract

There is a growing interest in the development of new construction systems and technologies capable of efficiently store thermal energy, thus reducing the energy consumption from fossil sources and their associated pollution, while at the same time cutting down the energy costs for the end user. Phase change materials are suitable to store thermal energy in the form of latent heat of fusion. Their use in the building industry is presently under development. Phase change materials, usually known as PCMs, can be incorporated in different constructive systems and technologies, as well as in auxiliary facilities. Presently, the relatively high price of these materials, together with several technical aspects, are the main drawbacks that limit their widespread implementation. The present chapter aims to present a brief review of today´s employment and availability of PCMs in the building industry.

Keywords: Phase Change Materials, PCMs, Thermal Storage, Building Industry

1. Introducción. La Energía Térmica

Existen diferentes tipos de intercambio energético industrialmente interesantes: mecánico, químico, eléctrico, magnético y térmico. El almacenamiento energético nos permite generar y consumir la energía de manera "diferida", lo que resulta económicamente interesante. El almacenamiento de energía es muy útil, pero tiene limitaciones diversas que dependen del tipo de energía que almacenemos. Cuando hablamos de almacenamiento energético nos referimos a un sistema que permita ser utilizado de manera reversible y continua. Una de las mayores fuentes de energía disponibles para ser almacenada es la energía térmica [1]. Un gran número de procesos industriales producen calor, el sol produce calor, y hasta la descomposición de los residuos y basuras producen calor. Por ello, el almacenamiento de energía térmica en sistemas reversibles es muy interesante a nivel industrial, económico y ecológico.

* anemiren.garcia@ehu.es

Citar como: García-Romero, A., Diarce, G. (2012). Materiales de Cambio de Fase para almacenamiento térmico y su empleo en edificación. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 129 – 146). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

¿Cómo se almacena la energía térmica? Hay tres formas de almacenar el calor [2]:

- Calor sensible.
- Calor latente.
- Calor de reacción química (energía termoquímica).

CALOR SENSIBLE: El calor sensible se almacena en un material de masa m y calor específico C_p elevando la temperatura del material de almacenamiento. Se expresa mediante la ecuación:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde Q es el calor almacenado, m es la masa del material, C_p es su calor específico y ΔT es el incremento de temperatura. El almacenamiento mediante calor sensible es el modo más común de almacenamiento térmico en el momento actual [3]. Los materiales más empleados para ello son el agua, aceites orgánicos, rocas, cerámicas y sales fundidas.

CALOR LATENTE: El calor latente es aquel asociado a las transformaciones de fase. Es el calor, Q, que debe emplearse para que una masa, m, de un material cambie completamente de fase. Viene dado por la ecuación:

$$Q = m \cdot \lambda$$

Donde Q es el calor almacenado, m es la masa del material y λ se conoce como calor latente de transformación de fase. Se mide en términos de energía por kg de material.

Hay cuatro tipos de transformaciones de fase que pueden ser empleados como medios de almacenamiento térmico:

- Sólido ↔ líquido
- Líquido ↔ vapor
- Sólido ↔ vapor
- Sólido ↔ sólido

Las transformaciones de fase son, en principio, isotermas. Esto quiere decir que la energía térmica se acumula y se recupera siempre a una temperatura fija, la cual se conoce como temperatura de transición, o de cambio de fase.

Los materiales que se emplean para acumulación térmica en transiciones sólido-líquido y sólido-sólido son conocidos con las siglas PCMs (del inglés, *Phase Change Materials*). Los más empleados habitualmente para temperaturas cercanas al ambiente, son: Ceras parafínicas, compuestos orgánicos no parafínicos, sales inorgánicas hidratadas, compuestos eutécticos (orgánicos e inorgánicos). A otras temperaturas se pueden emplear otro tipo de materiales: sales, metales, etc. Pero hay menos experiencia en ello.

ENERGÍA TERMOQUÍMICA: La energía térmica puede ser acumulada como calor de reacción en procesos químicos reversibles. De este modo, cuando la reacción química va en un sentido acumula calor (endotérmica), y cuando la reacción revierte cede calor (exotérmica).

$$A + B \leftrightarrow C + D + \Delta H$$

La cantidad de calor Q que puede almacenarse en una reacción química depende del calor de reacción y del grado de conversión que alcancemos en la misma:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H$$

Donde a_r es el grado de conversión alcanzado, ΔH el calor de reacción por unidad de masa, y m la masa.

Las reacciones químicas son generalmente procesos muy energéticos, por lo cual, en una pequeña cantidad de material se puede acumular mucha energía. De hecho, este es el principio en el que se basa toda la producción energética de combustión. Una ventaja adicional de la energía química es que no se necesita aislamiento térmico para guardar los productos de la reacción.

Algunos ejemplos son la descomposición de hidruros metálicos, de óxidos, peróxidos, sales amoniacales, carbonatos, etc. Sin embargo, la mayoría de reacciones químicas en condiciones sencillas son irreversibles (productos volátiles) y no es un modo muy habitual de almacenamiento térmico. Suelen requerirse condiciones muy especiales. Los combustibles, por poner un ejemplo, no lo permiten, puesto que el proceso de obtención de energía a través de ellos es irreversible.

Una forma específica de energía termoquímica es el calor de adsorción/ desorción de moléculas de agua o de un gas en un material. En el momento presente éste es el modo más simple de almacenamiento termoquímico. Se lleva a cabo mediante zeolitas (materiales de naturaleza iónica, silicatos) de elevadísima microporosidad; a través de la cual, permiten un elevado intercambio de adsorción/ desorción de agua.

2. El Almacenamiento Térmico, TES

El almacenamiento térmico, TES (de sus siglas en inglés *Thermal Energy Storage*), se emplea para ahorrar gasto de energía, almacenando el calor o el frío cuando está disponible como exceso o como subproducto [4]. Engloba todos los métodos de almacenamiento de calor descritos: sensible, latente y termoquímico.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el modo más habitual de almacenamiento térmico es en forma de calor sensible. Se emplea, fundamentalmente, para: calefacción de edificios; secado de cosechas; cocinas; generación de electricidad; calefacción industrial (aire y vapor); para aprovechar el calor residual de numerosos procesos; y para aprovechamiento de la energía solar. El empleo de calor solar almacenado para generar electricidad es actualmente muy importante. Hoy en día, muchas de las centrales térmicas solares disponen de sistemas de

almacenamiento térmico de calor sensible (sales fundidas), sector en el que existe, al mismo tiempo, un gran interés e incipientes investigaciones enfocadas al desarrollo de sistemas de almacenamiento en forma de calor latente [5]. En otras aplicaciones/sectores, en cambio, la tecnología de almacenamiento térmico más usada, desarrollada y barata es en agua líquida o en vapor.

El almacenamiento de frío es uno de los pocos modos de almacenamiento de energía que, además de ser habitual en forma de calor sensible, también es habitual como calor latente. El mayor empleo del "frío almacenado" es para:

- Enfriamiento de edificios
- Mantenimiento de alimentos y medicinas
- Transporte de materiales que no deban sobrepasar cierta temperatura

Uno de los modos industriales de almacenar el frío es fabricando hielo durante las horas "bajas" de electricidad (en España se ha quitado la tarifa nocturna, pero en otros países sigue existiendo), empleándolo para enfriamiento del aire durante las horas de electricidad cara.

La ventaja de emplear hielo frente al empleo de agua fría es que, con una misma cantidad de materia, el frío que se puede almacenar en el hielo es alrededor de 8 veces superior al que puede almacenar el agua en un gradiente de 10ºC:

- 1 kg de hielo almacena 335 kJ (para fundirse a 0ºC),
- 1 kg of agua almacena 42 kJ para un gradiente de 10°C.

La desventaja de usar almacenamiento en hielo (calor latente) es que su baja conductividad térmica hace que la transferencia de calor sea lenta.

El enfriamiento de edificios mediante la fusión de hielo (calor latente) se utiliza en algunos importantes edificios de EEUU y Canadá. El *Merchandise Mart of Chicago* tiene el mayor sistema de almacenamiento de hielo en el mundo. Fue instalado en 1980 por sus propietarios, la familia Kennedy. Por la noche fabrican más de 1000 toneladas de hielo que durante el día es bombeado como agua a 1ºC al sistema de acondicionamiento de aire.

En algunos casos, a pesar de que mediante calor latente se dispone habitualmente de más densidad energética, es más rentable el almacenamiento de frío en forma de calor sensible. Éste es, específicamente, el caso del almacenamiento geotérmico y del enfriamiento mediante acuíferos. Los mismos, se basan en pasar las conducciones con el fluido a refrigerar por grandes masas de agua, por lo que se almacena el frío sin gasto de energía.

Un caso paradigmático del almacenamiento de frío en acuíferos es el sistema de aire refrigerado centralizado del que dispone una gran parte de la ciudad de Estocolmo: se trata de un sistema centralizado, que emplea como fuente de frío los profundos pozos de agua del Báltico disponibles en los alrededores de la ciudad, cuya temperatura no es superior a los 4ºC a lo largo del año. Otros ejemplos de la refrigeración mediante acuíferos son el enfriamiento de los edificios de la Universidad de Alabama y del Servicio de correos de Long Island (NY).

Como colofón a todo lo redactado hasta este punto, podemos resumir lo siguiente:

- La energía térmica puede almacenarse en tres formas básicas: calor sensible, calor latente y calor de reacción. De los tres tipos de almacenamiento actualmente el más usado con diferencia es el calor sensible.
- Normalmente, el almacenamiento como calor sensible es muy barato: materiales económicos (agua, tierra, otros) e ingeniería muy sencilla. El material más empleado es el agua.
- Sin embargo, el calor latente y el calor de reacción pueden aportar grandes ventajas, debido a la mayor cantidad de calor almacenable en menor volumen de material.
- El almacenamiento como calor latente requiere mayores costes de ingeniería que el almacenamiento como calor sensible, debido al cambio de estado y de densidad del material a lo largo del proceso. Por ello, en muchos casos, sólo es rentable cuando los materiales que se emplean son baratos, o cuando es necesario emplear alguna de sus otras ventajas adicionales: mantenimiento estable de la temperatura o volumen reducido.
- El almacenamiento químico generalmente es el más costoso, y actualmente se encuentra en vías de investigación y desarrollo.

3. El Almacenamiento Térmico Latente. Materiales de Cambio de Fase

La materia puede existir en tres estados: sólido, líquido y gas. Hay un cuarto estado, el plasma, pero no es útil para nuestros propósitos. La materia puede transformarse de un estado a otro, y a esa transformación se le llama cambio de estado, o cambio de fase. En dicho cambio hay involucrado un gran intercambio térmico, denominado calor latente.

En el estado gaseoso existe una única fase que, además, es la misma para cualquier materia: todos los materiales en estado gaseoso son miscibles y forman una única fase.

En el estado líquido un material dado existe en una única fase posible. Pero diferentes materiales pueden formar fases líquidas diferentes, inmiscibles e independientes: aceite, agua, mercurio, escorias fundidas, sulfuros fundidos, etc.

Tabla 1
Valores de algunos calores específicos y latentes
(Fuente propia)

Tipo de Calor	*Energía asociada*
Calor específico del hielo a 0ºC	0,5 cal/g·K
Calor latente de Fusión del agua	80 cal/g
Calor específico del agua líquida a 0ºC	1 cal/g·K
Calor latente de vaporización del agua	540 cal/g

En el estado sólido, en cambio, un material puede presentar diferentes formas de organización de los átomos y a cada una de ellas se le denomina fase; metales y cerámicas son los mejores exponentes de ello. Así, existe también la posibilidad del cambio de fase sólido-sólido. Sin embargo, los cambios de fase sólido-sólido implican menor intercambio latente que los cambios de estado y su uso para almacenamiento térmico se encuentra a nivel de incipiente investigación [6]. Las transformaciones de fase que implican un gran intercambio de calor son además cambios de estado. El nombre que tiene cada uno de ellos se muestra en la Fig. 1.

Los cambios de fase se desarrollan de manera isoterma. Cuando se alcanza la temperatura del cambio de fase, el calor que damos al material se emplea en romper enlaces y en desorganizar la estructura interna del material, sin modificar la temperatura. Esto significa que se acumula en forma de entropía, y la temperatura no varía hasta que todo el material se ha transformado en la nueva fase.

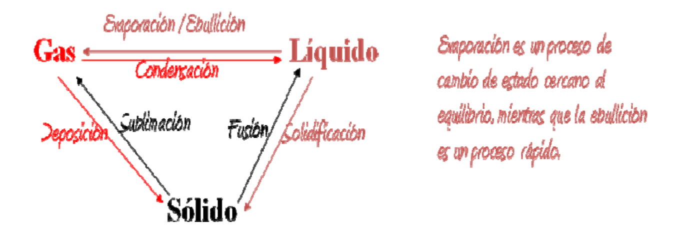


Fig. 1. Nombre de los cambios de estado de los materiales. Fuente propia.

A nivel industrial, el cambio de fase más relevante es el sólido-líquido. Los cambios sólido-gas y líquido-gas presentan una mayor entalpía de cambio de fase que los anteriores, pero el manejo de gases, y los cambios de volumen asociados, los hacen poco prácticos para almacenamiento térmico.

Sin duda, los ejemplos más habituales de empleo de cambio de fase como almacenamiento de calor son la fusión del hielo y la vaporización del agua. En condiciones ambientales normales el hielo funde a 0ºC, y hasta que todo el hielo se haya fundido la temperatura se mantiene constante, a 0ºC. Una vez fundido, si seguimos calentando el agua la temperatura se incrementa hasta alcanzar los 100ºC, donde comienza a "hervir". La temperatura se mantendrá a 100ºC hasta que toda el agua se haya convertido en vapor. Si seguimos calentando lo que conseguiremos es que el vapor aumente de temperatura. Los calores específicos y latentes del agua se presentan a modo de ejemplo en la tabla 1.

Los estudios sobre el almacenamiento térmico mediante el calor latente se iniciaron de manera consciente en 1950, por la Dra. María Telkes, si bien la conservación y generación de frío mediante "hieleras" es bien conocida, y los helados han sido fabricados desde la antigüedad aplicando los principios del calor latente de fusión de mezclas. La atención industrial a este concepto no tuvo lugar hasta inicio de la década de los 80 en el siglo XX, con la primera crisis energética fuerte.

A aquellos materiales que se emplean para almacenamiento de calor en forma de calor latente de fusión se les conoce como Materiales de Cambio de Fase, o PCMs. Actualmente nos encontramos en fase de I+D para lograr materiales fiables e interesantes, si bien hay ya algunos desarrollos que se encuentran en una primera etapa de industrialización [7]. En cuanto al empleo de estos materiales, se ha investigado su uso para aprovechamiento de energía solar y de recuperación térmica de residuos y basura. Dependiendo de la temperatura de cambio de fase, los materiales que pueden emplearse corresponden a distintos tipos o familias. La tabla 2 muestra las principales familias a distintas temperaturas. En el sector de la edificación el mayor interés se ha centrado en el empleo de PCMs con cambio de fase a temperaturas de confort.

Tabla 2
Familias de PCMs para distintas temperaturas de almacenamiento (Fuente propia)

Temperatura de almacenamiento	*Familias de materiales*
Para Temperaturas de refrigeración (-20ºC a 0ºC)	Mezclas eutécticas de agua y sales inorgánicas
Para Temperaturas de confort en edificación y uso general doméstico (0ºC a +50ºC)	Parafinas Sales hidratadas
Para Temperaturas de acumulación auxiliar (50ºC a +150ºC)	Parafinas Otros orgánicos Alguna sal inorgánica
Para Temperaturas de acumulación solar térmica o industrial (>200ºC)	Sales inorgánicas Metales

4. Requisitos para los Materiales de Cambio de Fase

Si bien el concepto de Material de Cambio de Fase es simple, y dado que la mayoría de los materiales presenta cambios de fase sólido-líquido, podría pensarse que todos los materiales pueden en principio ser empleados como PCMs para almacenamiento térmico. Sin embargo, el empleo con este fin requiere adicionales requisitos que conducen a que el número de potenciales candidatos disminuya notablemente. Los principales requisitos que debemos considerar para elegir un PCM podemos resumirlos en los siguientes puntos [4]:

- Temperatura de cambio de fase adecuada para el proceso en que queramos almacenar la energía.
- Temperatura única de cambio de fase, o intervalo pequeño de cambio de fase.
- Entalpía de cambio de fase elevada para permitir una gran densidad de energía almacenada, en comparación con lo que se puede obtener mediante calor sensible.

- Estabilidad, cambio de fase reproducible, sin degradación en el ciclado térmico durante el nº de ciclos que se requieran en la aplicación a que se destine.
- Cambios de volumen pequeños.
- Presión de vapor baja.
- Subenfriamiento (también denominado sobreenfriamiento) de solidificación pequeño (elevada velocidad de nucleación al solidificar). Veremos brevemente más adelante lo que es el subenfriamiento.
- Conductividad térmica elevada, tanto en sólido como en líquido.
- Compatibilidad con los materiales en contacto con el PCM (que no haya corrosión).
- Velocidad de crecimiento de cristales elevada para que podamos recuperar la energía térmica rápidamente.
- Requisitos de seguridad medioambientales o de otro tipo: Baja toxicidad, biocompatibilidad, no alergénico, no inflamable, autoextinguible, no explosivo, etc.
- Bajo precio, para que resulte competitivo con otras opciones de almacenamiento térmico (calor o frío) con las que compita.
- Buena reciclabilidad, por razones medioambientales y económicas.

La realidad es que el número de potenciales materiales que cumplan todas las características es muy escaso, razón por la cual actualmente aún nos encontramos en la etapa de investigación y desarrollo industrial.

El primer criterio que se tiene en cuenta para seleccionar un PCM es la temperatura de cambio de fase, y a continuación se verifica que la entalpía es adecuada. A partir de aquí, los potenciales candidatos generalmente empiezan a no "cumplir" todos los requisitos: es difícil encontrar un PCM que reúna todos los condicionantes físicos, técnicos y económicos [8].

En algunas aplicaciones la definición de la temperatura de cambio de fase puede ser crítica (almacenamiento térmico en una central solar térmica), mientras que en otras se puede admitir un rango de temperaturas (inercia/confort térmicos en un edificio). Las mayores limitaciones suelen encontrarse en conjugar:

- Buena conductividad térmica.
- Bajo sobreenfriamiento.
- Baja inflamabilidad.
- Compatibilidad química.

Vamos a ver brevemente algunos de los principales aspectos que definen el funcionamiento de un material PCM, y que podrían no ser evidentes.

4.1 Temperatura de cambio de fase

Los materiales puros presentan el cambio de fase a una temperatura concreta, bien definida. La presencia de impurezas hace que las propiedades térmicas cambien. Las mezclas, en general, presentan un intervalo de temperatura denominado semisólido, o *solidus-liquidus*, en el cual el cambio de fase tiene lugar gradualmente, tal como puede observarse en la Fig. 2.

Mientras que en unos casos este intervalo puede ser pequeño, en otros es muy amplio, invalidando el potencial uso del material como PCM. De este modo, el uso de materiales puros reduce el número de posibles candidatos en gran medida, a la vez que encarece notablemente la producción en la mayor parte de los casos. El uso de mezclas de materiales, además de ampliar el posible rango de temperaturas de cambio de fase, abarata en gran medida la producción, dado que la mayoría de materiales industriales presentan un cierto grado de impurezas mezcladas. Se trata de emplear en cada caso concreto los materiales con el nivel de pureza requerido.

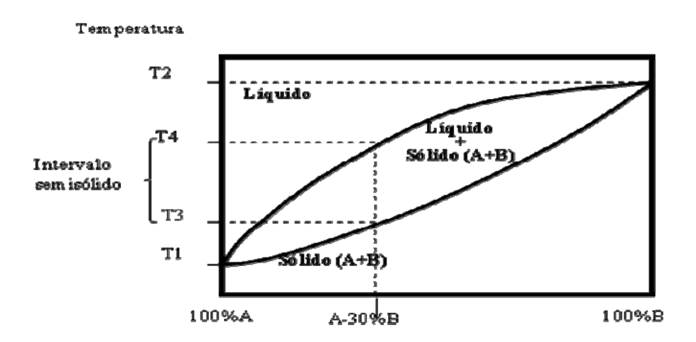


Fig. 2. Intervalo semisólido en mezclas de materiales. Fuente propia.

Especial interés tienen las denominadas mezclas eutécticas, las cuales corresponden a composiciones concretas que desde el punto de vista térmico se comportan como si fuesen compuestos puros, cambiando de fase a una temperatura única, no en un intervalo. La temperatura de fusión de las mezclas eutécticas es, además, inferior a la temperatura de fusión de los compuestos que la constituyen. No vamos a ahondar en el estudio de las características de las mezclas eutécticas, los cuales pueden consultarse en numerosos textos de Ciencia de Materiales.

4.2 Estabilidad frente al ciclado térmico

La función de un PCM es almacenar calor mediante un proceso de fusión, y suministrarlo mediante un proceso de solidificación. Por ello, se requiere que el material presente una elevada estabilidad en el ciclado térmico. Si se trata de compuestos puros, los problemas de estabilidad son menores, aunque la degradación puede ocurrir con el tiempo debido a procesos oxidativos, corrosivos o de otro tipo.

Si se trata de mezclas, la inestabilidad puede ser superior debido a que en el proceso de solidificación puede existir segregación al fondo del contenedor de la fase sólida que se va formando, conduciendo a una modificación composicional zonificada.

En este apartado debe hacerse una mención especial a las denominadas sales hidratadas. Estas sales son compuestos en los cuales el agua forma parte constitutiva

de la fase sólida cristalina. Al fundirse y transformarse en líquido se produce lo que se denomina una fusión incongruente, formándose una fase líquida y un precipitado sólido, generalmente la sal anhidra. Si el proceso de solidificación subsecuente tiene lugar en un largo periodo de tiempo (días, o incluso semanas), la fase sólida precipitada y el líquido se recombinan para formar la sal hidratada, cediendo el calor latente completo y regenerándose el material de partida. Pero generalmente los periodos de almacenamiento y uso del calor suelen ser inferiores al tiempo requerido para la regeneración natural de las sales hidratadas. Ello conduce a que en unos pocos ciclos la sal hidratada haya perdido completamente su capacidad de almacenamiento térmico [9].

Un ejemplo de fusión incongruente es la que muestra la denominada sal de Glauber, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$. Esta sal hidratada fue el primer material investigado con función de PCM [10]. La sal de Glauber es muy interesante porque es muy barata, con buena entalpía de fusión, funde a 32ºC y no es corrosiva con la mayoría de aleaciones de Fe y de Al. Pero su fusión incongruente conduce a la formación y precipitación de la sal anhidra sólida a la vez que se forma la fase líquida. Para solventar la segregación de líquido y sólido se han estudiado varios tipos de estrategias, no todas exitosas. La más empleada es la mezcla del PCM con un material espesante que impida la segregación del sólido y el líquido en la fusión. También se han empleado gelificantes con la misma finalidad. Actualmente existe un gran interés en microencapsular pequeñas partículas de las sales (tamaño micrométrico) en "fundas" poliméricas. Es una medida que soluciona el problema de la segregación y presenta numerosas ventajas en la manipulación y empleo del PCM, pero que intensifica el problema del subenfriamiento (que se explica a continuación).

4.3 Subenfriamiento

El subenfriamiento, también llamado sobreenfriamiento, es un fenómeno que tiene lugar durante la cristalización desde la fase líquida. Ocurre en la mayoría de los materiales. La mayoría de los compuestos monofásicos inorgánicos (metales, sales puras, etc.) "padecen" sobreenfriamiento. Las parafinas y otros materiales poliméricos presentan este problema en mucha menor medida.

El sobreenfriamiento está relacionado con la solidificación de los materiales, no con la fusión. La fusión ocurre de manera normal cuando se alcanza el punto de fusión del material, donde el sólido emplea el calor en aumentar su entropía y transformase en líquido. Al enfriar el líquido, en cambio, deben formase núcleos cristalinos estables, los cuales después crecen y todo el material se transforma en sólido. El sobreenfriamiento está asociado con la formación de los primeros núcleos sólidos, un fenómeno denominado nucleación. Los núcleos, en muchos materiales, no son estables hasta temperaturas muy inferiores a la de fusión. Este fenómeno es bien conocido y empleado en la ingeniería de aleaciones para manejar diversos aspectos de las mismas. Existe mucha información disponible acerca del subenfriamiento en la bibliografía de Ciencia de los Materiales [11,12].

Cuando los compuestos presentan un amplio intervalo de subenfriamiento, la solidificación se inicia a una temperatura muy inferior a la de fusión, por lo cual las temperaturas de almacenamiento de calor y de recuperación del mismo presentan un desfase. Dependiendo de la amplitud del desfase, en algunas aplicaciones puede ser admisible mientras que en otras puede ser inadecuado. El subenfriamiento que presentan algunas sales hidratadas puede ser tan grande como 20-30ºC, mientras que el que presentan los compuestos parafínicos suele ser inferior a 2-3ºC.

La reducción del intervalo de sobreenfriamiento se consigue en muchos casos mediante la adición de agentes nucleantes, o mediante la inserción de un punto de congelación externo (*cold-finger*).

4.4 La conductividad térmica

El objetivo del almacenamiento térmico es acumular toda la energía térmica que el material es capaz de almacenar en forma de calor latente. Pero para que sea eficaz siempre se debe tener en cuenta la cinética del proceso. Incluso en los casos en que la cinética de suministro/sumidero de calor sea lenta, cuanto mayor sea la conductividad térmica del PCM mayor garantía tendremos de que vamos a emplearlo en su totalidad para almacenar/emplear el calor disponible [13].

En los casos en que la cinética de los procesos de producción o uso del calor deba ser rápida, la conductividad térmica de los PCMs suele ser el factor limitante de la eficacia de los sistemas: Todos los PCMs a temperaturas útiles en edificación/industria (-20ºC-+250ºC) tienen una conductividad térmica relativamente baja (menor de la deseada).

Un modo de paliarlo es desarrollar sistemas en que podamos maximizar la superficie de contacto captadora/emisora, optimizando el diseño del contenedor para obtener una gran superficie de contacto de un buen material conductor. Otro modo de abordar la mejora de la conductividad térmica es produciendo composites de matriz PCM que contengan partículas, o fibras, o elementos insertados de otros tipos, que sean buenos conductores térmicos. En todos los casos, es necesario minimizar el volumen y masa del material conductor para evitar una reducción significativa del almacenamiento térmico del PCM.

4.5 El manejo sólido-líquido

Dado que la función de PCM implica un cambio del estado sólido al estado líquido, la ingeniería del proceso que contenga PCM deberá ser capaz de manejar ambos estados y de prever y buscar soluciones para acomodar los cambios volumétricos y las tensiones que se generan cuando el material solidifica. Esto hace que los sistemas de almacenamiento térmico latente sean más complicados que los sistemas de almacenamiento térmico sensible.

La incorporación directa mediante mezcla, de materiales PCM en materiales de construcción (escayolas, cementos, otros) debe ser exhaustivamente evaluada previamente a su uso, requiriéndose un extenso ciclado térmico previamente a poder ser empleados en edificaciones reales. Dado que el PCM se trasformará en líquido y sólido sucesivamente, se debe garantizar que no exista exudación cuando el PCM es líquido, y que no exista agrietamiento significativo debido a las tensiones creadas cuando el material solidifica. Adicionalmente, si los PCMs son sales hidratadas, es previsible que en muchos casos pueda existir reactividad química con los materiales cerámicos de construcción. Los estudios publicados hasta el momento han mostrado siempre problemas asociados con estos tres aspectos, por lo cual en principio no es posible emplear mezclas directas de PCMs con materiales de construcción.

La solución encontrada a los citados problemas se encontró en la microencapsulación [14]. Esta consiste en preparar micropartículas del PCM que son encapsuladas individualmente en una “funda” polimérica. La manipulación y uso de los PCMs microencapsulados tiene las grandes ventajas de evitar la posible reacción entre el PCM líquido y los materiales de construcción, y la contención del líquido en todo momento en su cápsula polimérica. De este modo, la ingeniería del proceso se limita al manejo de sólidos. La mayor desventaja que presenta el uso de microencapsulados es el precio. No obstante, los PCMs microencapsulados, además de su elevado precio, pueden presentar problemas de sobreenfriamiento acentuado (cuanto menor es el tamaño de partícula mayor es el intervalo de sobreenfriamiento) y de rotura de la cápsula polimérica, por lo cual no pueden considerarse como la solución universal a emplear.

5. Familias de Materiales de Cambio de Fase

Los materiales de cambio de fase se suelen clasificar en “familias”. Tanto el punto de fusión como el calor latente están asociados a “la familia”. Ello es debido a que ambos dependen básicamente de aspectos atómico-moleculares tales como los enlaces químicos, la estructura cristalina, etc. Los materiales de un mismo tipo se comportan térmicamente de un modo similar. La Fig. 3 muestra a grandes rasgos las distintas familias de materiales disponibles a distintas temperaturas, así como los rangos de entalpía de fusión que se encuentran en las mismas.

A temperaturas inferiores a 0ºC, los materiales disponibles y empleados son salmueras, es decir mezclas de sales y agua. Estas mezclas forman composiciones con puntos de fusión inferiores al del agua.

Entre 0ºC y +160ºC hay varias familias de materiales, tanto orgánicos como inorgánicos. Los materiales orgánicos disponibles son básicamente parafinas, ácidos grasos (aceites) y polialcoholes (azúcares). Los materiales inorgánicos disponibles a estas temperaturas son sales hidratadas, en las cuales el agua es una parte constitucional de las mismas, y algunas mezclas eutécticas de sales anhidras (mezclas de nitratos). Incluso hay algunos compuestos mixtos orgánicos-inorgánicos, como son los clatratos, compuestos que se forman generalmente de manera dañina en los gaseoductos. Este rango de temperaturas es el que más interesa en edificación.

A temperaturas superiores a +150 °C, se dispone de diferentes sales y/o mezclas de las mismas. Estos rangos de temperatura pueden ser importantes en un futuro para el desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico latente en centrales de energía solar térmica. En este sentido, se encuentran en investigación actualmente sistemas de almacenamiento latente en metales. En el presente trabajo únicamente nos vamos a centrar en los materiales útiles para potencial uso en edificación.

Un dato relevante es que la densidad de energía es, en líneas generales, proporcional al punto de fusión (en K). Esto se explica termodinámicamente mediante la teoría de Richard [4]: la entalpía de fusión por unidad de volumen es directamente proporcional a:

- Temperatura de Fusión.
- Número de enlaces por molécula.
- Densidad/masa molar (densidad de empaquetamiento).

Debido a este comportamiento, para similares temperaturas de fusión la mayoría de compuestos inorgánicos tienen mayor entalpía de fusión que los compuestos orgánicos ya que su densidad de empaquetamiento es muy superior. Así que en principio, térmicamente suele ser más ventajoso usar PCMs inorgánicos. Aunque es una generalización y debe ser tomada con cautela.

5.1 PCMs orgánicos

La propuesta de emplear materiales orgánicos como PCMs es relativamente reciente, desde aproximadamente 1985. Hay varios aspectos positivos que son comunes a todos los PCMs orgánicos en comparación con los inorgánicos (sales hidratadas, puesto que ambas familias ocupan los mismos rangos operativos de temperatura). Son los siguientes [15]:

- Fusiones congruentes.
- Subenfriamiento despreciable.

De entre los compuestos orgánicos, las parafinas ocupan un destacado lugar debido a su gran estabilidad, prácticamente despreciable sobreenfriamiento y fácil ingeniería para ser producidas con el punto de fusión deseado. Se trata de hidrocarburos saturados de cadena lineal, sólidos a Tª ambiente y que, básicamente, consisten en ceras. Son el tipo de PCM orgánico más utilizado, con mucha diferencia sobre los demás. Hay diferentes parafinas con puntos de fusión entre 23ºC y 67ºC: cuanto más larga sea la cadena alcánica mayor será el punto de fusión.



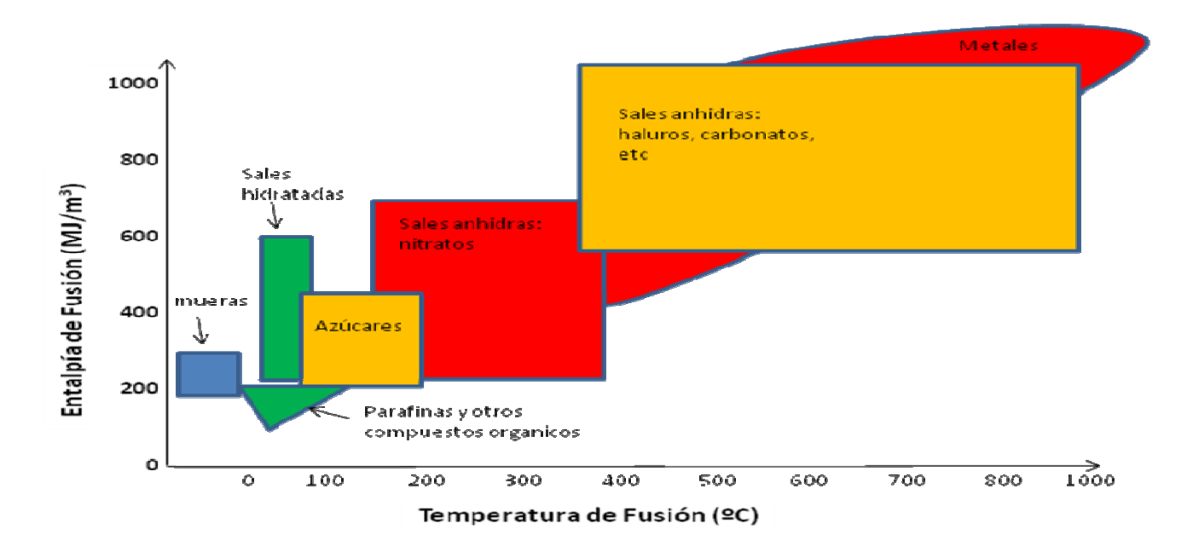


Fig. 3. Familias de PCMs en función de la temperatura y entalpía de fusión.
Fuente propia.

La cera parafínica comercial es una mezcla de varias parafinas, obtenidas del craqueo del petróleo, por lo cual tendremos un intervalo de solidificación grande. La obtención de una parafina única, pura, requiere de un extensivo craqueo y encarece su producción ostensiblemente.

Los estudios realizados [16] certifican que las parafinas pueden aguantar hasta 1500 ciclos de fusión-solidificación con pérdidas inferiores al 10% en la entalpía de fusión, y sin variación en la temperatura de cambio de fase. Son por tanto muy estables, además de ser muy inertes y no reactivas, pero con el tiempo se oxidan por lo cual deben ser empleadas en contenedores cerrados. Las entalpías de fusión de las parafinas que se emplean como PCM se encuentran en torno a 150-200 kJ/kg, con un peso específico inferior a 1g/cm^3. Son compatibles con todo tipo de metal (no son corrosivas). Las contrapartidas de las parafinas son el elevado coste cuando la pureza es alta; la baja conductividad térmica en estado sólido, su alta inflamabilidad, y el gran cambio de volumen sólido-líquido. A pesar de todos estos inconvenientes, son la familia de PCM más empleada actualmente.

El empleo de otros compuestos orgánicos se encuentra en investigación, no existiendo hasta el momento actual ningún desarrollo en vías de industrialización o comercialización. En general, todos ellos presentan en común su elevada inflamabilidad y la oxidación de enlaces dobles en presencia prolongada de oxígeno. Los que presentan potencialmente mayores posibilidades de uso a temperaturas de confort en edificación son los ácidos grasos, mientras que a temperaturas más elevadas los azúcares son muy buenos candidatos. Su fórmula genérica es $HO\text{-}CH_2\text{-}[CH\text{-}(OH)]_n\text{-}CH_2\text{-}OH$. Tienen un buen número de ventajas, tales como elevados puntos de fusión (entre 90-200ºC), adecuados para almacenamiento térmico en sistemas auxiliares energéticos (depósitos de calefacción y agua), gran densidad, la cual conduce a elevada densidad de energía y, no sólo no son tóxicos, sino que incluso son biocompatibles. Su mayor desventaja es que, a diferencia de otros compuestos orgánicos, los azúcares presentan un gran subenfriamiento.

5.2 PCMs inorgánicos

Los principales PCMs inorgánicos a temperaturas útiles en edificación consisten en sales hidratadas. El agua forma parte constitutiva de los cristales salinos. Normalmente existe una relación fija en el nº de moléculas de agua que se combinan con una sal dada para formar un cristal concreto [9]. El agua y los elementos de la sal ocupan posiciones definidas en estos cristales. Así, por ejemplo, en el caso de la sal $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, la estructura cristalina está formada de modo que los átomos de Mg ocupan el centro de un octaedro en cuyos vértices se hallan las moléculas de agua. Estas estructuras son muy estables y tienen puntos de fusión más elevados que el agua, entre 0ºC y +130ºC.

Las sales hidratadas tienen una excelente entalpía de fusión volumétrica, entre 150 y 300 kJ/kg, con pesos específicos en torno a 1,5g/cm^3. La tabla 3 muestra algunas de las sales hidratadas estudiadas por diversos autores para ser empleadas como PCMs. La conductividad térmica es similar a la del agua y sus mezclas eutécticas. La presión de vapor es inferior a la del agua a la misma temperatura, pero aún así puede ser un problema con sales de elevado punto de fusión.

Tabla 3
Algunas sales hidratadas estudiadas por diversos autores para ser empleadas como PCMs
(Fuente propia)

Sal hidratada	*Tª fusión (ºC)*	*Entalpía de fusión (kJ/kg)*	*Densidad líquido / sólido (kg/m3)*
$LiCO_3 \cdot 3H_2O$	8	155	1530 / 1720
$KF \cdot 3H_2O$	18.5	231	1447 / 1455
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29.3	172	1562 / 1710
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	30	296	n.d.
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32	254	----/1485
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	35-44	280	1442 / 1522
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48-55	187	1670 /1750
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	265	1937 / 2180
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	90	149	1550 / 1636
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	117	165	1450 / 1569

La mayoría de las sales hidratadas son muy estables químicamente, son muy baratas comparadas con otros PCMs (1-3 euros/kg), presentan unos puntos de fusión muy interesantes para el sector de edificación, no son inflamables, incluso son ignífugas, y la entalpía de fusión volumétrica es muy alta, muy superior a la que ofrecen los productos orgánicos [4]. La mayoría no son corrosivas para los metales más usuales. La parte menos positiva es que pueden segregarse en fases diferentes durante el continuado ciclado térmico debido a que suelen presentar fusión incongruente. Además, presentan un importante sobreenfriamiento, el cambio volumétrico durante el cambio de fase se encuentra en torno al 10% y una parte de ellas son corrosivas para la mayoría de metales (los cloruros) mientras que otras lo son específicamente para los aluminios (carbonatos).

La mayoría de los compuestos iónicos son miscibles entre sí. Por ello, es posible realizar mezclas estables de sales hidratadas entre ellas, o entre ellas y sales anhidras. Cuando mezclamos dos sales obtenemos mezclas que pueden formar compuestos con un intervalo semisólido, o bien compuestos eutécticos. Un caso interesante es la mezcla de sales anhidras con sales hidratadas: conseguimos modificar los puntos de fusión, reducir el sobreenfriamiento y evitar la fusión incongruente. De momento hay algunas mezclas de este tipo estudiadas e incluso comercializadas, ($CaCl_2 \cdot 6H_20$ + pequeñas cantidades de NaCl + KCl para reducir el sobreenfriamiento) que pueden conducir a nuevos productos en el futuro [4]. Sin embargo, los desarrollos de mezclas de sales se han venido realizando de manera empírica y experimental, por lo cual los frutos obtenidos son escasos. En el futuro sería necesario basar estos desarrollos en cálculos termodinámicos de estabilidad y transformación de fases en mezclas, algo que no es nada sencillo.

6. Funcionalidad de los Materiales de Cambio de Fase, PCMs, en construcción

El uso de PCMs permite dotar de distintas funciones o propósitos a un componente o estructura dados. Las principales son probablemente las siguientes: dotar a los edificios de inercia térmica, evitar sobrecalentamientos y el desarrollo de sistemas activos de refrigeración. Vamos a verlas brevemente.

6.1 Inercia Térmica

En el caso de las edificaciones, la función más extendida y habitual para la que se propone el empleo de PCMs es dotar de inercia térmica a estructuras ligeras. La inercia térmica es la capacidad de mantener constante la temperatura del interior a pesar de que se produzcan grandes cambios de temperatura en el exterior, o de que en el interior se produzcan variaciones grandes de emisión de calor. Por ejemplo, en un aula donde 60 alumnos asistan a clase durante cuatro horas seguidas se generará una gran cantidad y se recalentará. En cambio, durante la noche, si hace frío se enfriará notablemente. Si el edificio tiene gran inercia térmica será capaz de absorber durante el día el calor generado en el interior, y durante la noche ceder calor lentamente, de modo que el interior no se enfríe. Igualmente, en verano el edificio irá acumulando calor lentamente, de modo que el recalentamiento del interior es lento y paulatino. Cuanto mayor sea el calor capaz de ser acumulado por la edificación y los materiales que la conforman, mayor es la inercia térmica del edificio.

Inercia y aislamiento térmico son conceptos y funciones diferentes. Un buen aislamiento es aquel que dificulta o impide el intercambio de calor entre el exterior y el interior del edificio. La inercia térmica conduce a condiciones estables de temperatura, tanto si la variación de calor proviene del exterior como si se produce en el interior. El aislamiento térmico es necesario para minimizar gastos energéticos, pero no es suficiente. La inercia térmica proporciona temperatura estable al interior, racionalizando así el gasto energético en calefacción y refrigeración y evitando sobrecalentamientos/enfriamientos. El aislamiento térmico se consigue empleando materiales de baja conductividad térmica, mientras que la inercia térmica se consigue dotando al edificio de una elevada capacidad de almacenamiento de calor.

Tradicionalmente la inercia térmica se ha conseguido en los edificios mediante el uso de grandes masas de material con elevada capacidad calorífica y baja conductividad térmica (rocas, ladrillos, hormigones) [17]. Así, el calor era almacenado en las estructuras en forma de calor sensible. Sin embargo, se puede conseguir el mismo efecto empleando cantidades muy inferiores de material si almacenamos el calor como calor latente en lugar del calor sensible; es decir, usando PCMs.

Un cálculo aproximado del calor que una parafina puede acumular o ceder entre 22-26ºC (considerando un valor medio de las parafinas empleadas en esas temperaturas) se encuentra alrededor de 130 MJ/m^3, alrededor de 18-20 veces lo que puede acumular un material tradicional, como el ladrillo, en el mismo volumen. La Figura 4 muestra el espesor relativo que proporciona una inercia térmica equivalente en distintos materiales de construcción.

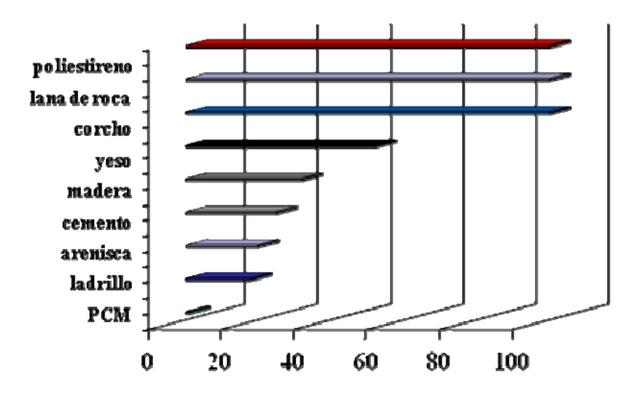


Fig. 4. Espesor relativo requerido para acumular una misma cantidad de calor en distintos materiales de construcción. Fuente propia.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el añadir pequeñas cantidades de PCM en las paredes interiores de un edificio puede aumentar en gran medida la inercia térmica del mismo, manteniendo su ligereza y esbeltez. Hasta el día de hoy, una parte importante de los esfuerzos en investigación orientados a este campo, han estado enfocados al desarrollo de cementos y hormigones con PCMs [18,19]. Sin embargo, hasta el momento no parecen haber sido suficientemente desarrollados.

En cuanto a los productos ya comercializados, en el mercado hay varios materiales destinados a producir cerramientos interiores ligeros dotados de elevada inercia térmica. A los mismos les dedicaremos la sección 7 del presente texto.

6.2 Refrigeración Activa

Otro modo de emplear de manera eficaz la capacidad de los PCMs es emplearlos en intercambiadores de calor para refrigerar interiores. En este caso el PCM se instala en un sistema de refrigeración activo. Hasta el momento actual se trata de sistemas prototipo, de desarrollo experimental, con diseños diversos y sólo en algunos casos comercializados.

La compañía Imtech (Alemania), a través de un proyecto de investigación cooperativo con FIZ (Karlsruhe), desarrolló una unidad de intercambio de aire con PCM. El aire nocturno se hacía pasar por un intercambiador relleno de PCM y así se acumulaba el frío. El PCM que emplearon es un composite Grafito-Parafina para asegurar un buen intercambio térmico. En el prototipo que desarrollaron (2004) se preparó un apilamiento de placas que contenía un total de 35 Kg de parafina, y por tanto capaces de acumular 1kWh de energía. El apilamiento se insertó en el conducto de aire acondicionado. La zona inferior del apilamiento lleva un ventilador para mover el aire, el cual puede variar de velocidad para regular la refrigeración.

Por la noche se inserta aire nocturno, se enfría la habitación, y el aire frío pasa por el sistema de acumulación, almacenando el frío. Por el día es el aire caliente de la habitación el que pasa por el intercambiador enfriándose, y volviendo a la habitación de nuevo. El resultado final se plasmó en un producto comercial denominado Encovent PCM-Modul, que distribuye la compañía Emco. Se puede encontrar información más detallada en la website de la empresa:

http://www.emco.de/de-en/klima/emcovent/pcm-systems.html

A través de un proyecto conjunto, las compañías Faber Maunsell y Climator (Suecia) desarrollaron un sistema específico para techos con el fin de refrigerar el aire. Se llama CoolDeck. Se desarrolló como solución específica para un edificio de oficinas del Ayuntamiento de Stevenage (Inglaterra), y consiste en paneles metálicos rellenos con bolsas de PCM (Fig. 5). Los paneles se colocan pegados al techo, debajo del cual se coloca un falso techo. El sistema requiere de aireación forzada (un ventilador) en la cámara de aire que queda entre techo y falso techo, y de ventiladores en las ventanas.

Por la noche los ventiladores de las ventanas introducen el aire frío, que es conducido por los ventiladores del falso techo para almacenarlo en el PCM. Durante el día, las ventanas se operan manualmente y los ventiladores de techo se activan únicamente cuando la Tª de la habitación supera un valor prefijado, liberándose así el frío acumulado. Los resultados presentados por Nick Barnard, en la conferencia “Phase Change in Action, Revival Conference” (Cambridge University, 2008), muestran que se redujo la Tª pico de las oficinas en 5K, de los cuales se estima que 1-2K se debió a la colocación de persianas, no relacionado por tanto con el sistema de refrigeración PCM. En el momento actual se está implementando en dos nuevas instalaciones prototipo en Amersfoort (Holanda) y en Karlsborg, (Suecia).

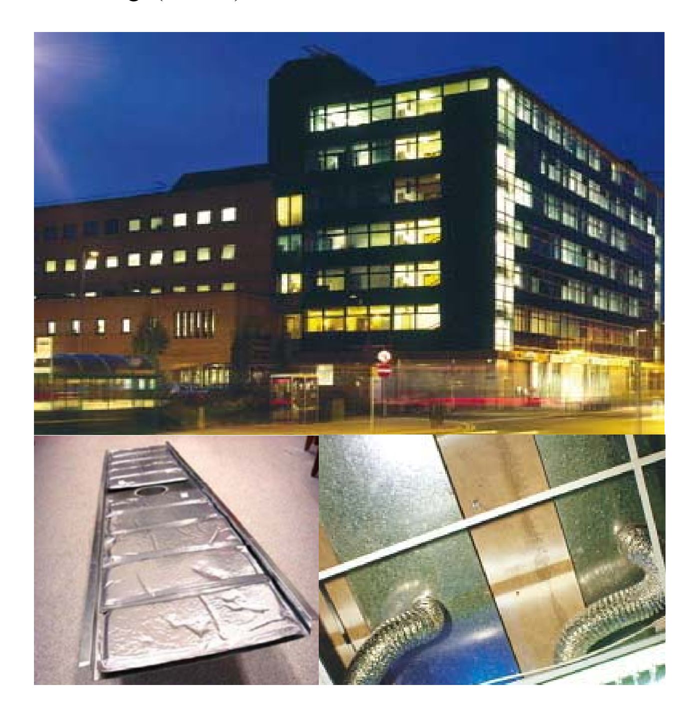


Fig. 5. Daneshill house (Stevenage, UK), en cuyo interior se instaló un sistema de refrigeración con PCM (Cooldeck, Climator) en el proyecto REVIVAL (2002-2006)
(Imagen propiedad: *http://www.constructingexcellence.org.uk)*

Hay varios sistemas más, desarrollados para ser introducidos en intercambiadores de calor, o en conductos de aire. Los desarrollos ofertados comercialmente se incluyen en el apartado 7 de este capítulo.

6.3 Evitar sobrecalentamientos

Los PCMs se pueden utilizar también como parte de un sistema de seguridad que impida el sobrecalentamiento por encima de una temperatura dada en caso de un corte de energía que paralice el sistema de refrigeración primario durante un tiempo relativamente prolongado. El PCM debe elegirse con una temperatura de fusión inferior a la máxima admisible, y debe estimarse con holgura la cantidad mínima de PCM para lograr el objetivo durante un tiempo dado.

Son varias las potenciales aplicaciones en edificación que pueden preverse con esta función, como por ejemplo el uso como sistema de mantenimiento de frío en instalaciones cuyo suministro eléctrico sea solar. Así, en periodo nocturno, o en días nublados con poca energía eléctrica, un sistema de PCM puede garantizar que la temperatura no sobrepase un límite de seguridad fijado. La empresa PCM Energy de La India desarrolló un interesante proyecto para Turnkey Advanced Thermal Management Systems (ATMS), cuya imagen se muestra en la Fig. 6. Instalaron un gran pack de PCM en las casetas que alojan la electrónica de las antenas de telefonía móvil. Para el correcto funcionamiento de la electrónica la temperatura no debe sobrepasar ciertos límites. Por ello, en países cálidos y soleados, como La India, estas casetas están climatizadas mediante un sistema de climatización tradicional eléctrico. Sin embargo, los fallos de estos sistemas no son raros y pueden conducir al fallo electrónico de la antena. Para prevenirlo, se instalaron empaquetados de PCM dentro de las casetas, con el fin de tener un sistema de seguridad que permita un plazo de tiempo prudencial para subsanar el fallo del climatizador sin que el sistema electrónico se dañe.



Fig.6. Caseta de equipamiento electrónico en India. Los contenedores blancos que se pueden ver en la imagen se encuentran rellenos con PCM. Su función es evitar sobrecalentamientos en el caso de que ocurra un corte prolongado en el suministro eléctrico, los cuales no son infrecuentes. (Imágenes e información: *http://pcmenergy.com*)

7. PCMs comerciales

Estamos en el inicio del desarrollo e industrialización de los sistemas de almacenamiento térmico latente. Por ello, el número de fabricantes de PCMs, y de fabricantes de soluciones que contienen PCMs, es muy escaso a nivel mundial, no siendo superior a 15 las empresas que comercializan materiales o sistemas constructivos cuya función es actuar como PCM. Cabe citar entre ellas a grandes corporaciones químicas, como Basf o Dupont, y a pequeñas empresas surgidas de desarrollos universitarios. La tabla 4 comprende la mayor parte de dichas empresas.

Una buena parte de ellas comercializan PCMs basados en parafinas (Rubitherm, Basf, Dupont), mientras que otras comercializan materiales basados en sales hidratadas. Todos ellos consisten en materiales que han pasado por un proceso de ingeniería para garantizar un cierto nivel de estabilidad y características que permitan emplear los materiales como PCMs.

Además de los desarrollos enfocados a construcción, existen algunas empresas adicionales que han sacado partido del uso de PCMs en tejidos, contenedores para transporte, etc.

Algunas de estas compañías producen y suministran materia prima, PCMs, mientras que otras suministran soluciones desarrolladas con los PCMs contenidos en ellas. Podemos englobar la oferta disponible en cuatro tipos genéricos de productos:

- Materia prima tratada suministrada a granel.
- Microencapsulados de PCMs suministrados a granel.
- Macroencapsulados de PCMs de diversos tipos.
- Productos de construcción que contienen PCM.





Fig. 7. Imágenes de materiales de cambio de fase suministrados por Rubitherm. A la izquierda, Rubitherm PK. Se trata de un compuesto de cambio de fase atrapado en un entrecruzamiento polimérico, de manera que cuando el compuesto se funde queda atrapado y retenido en la red del polímero. A la derecha, Rubitherm RT. Se trata de parafinas con punto de fusión a diversas temperaturas.
(Imágenes e información propiedad de: *http://www.rubitherm.de*)

7.1 PCMs a granel

Son varias las compañías que ofertan PCMs consistentes en el material base con aditivos. Éstos (los aditivos) tienen la función de asegurar la estabilidad y el buen funcionamiento como PCM de los materiales base, y por tanto forman parte del conocimiento y valor de la empresa suministradora. La mayoría de estas empresas se

Tabla 4.
Empresas que comercializan materiales o soluciones constructivas con PCMs
(Fuente propia)

Empresa	*Dirección web*	*País*
EPS Ltd.	*http://www.epsltd.co.uk*	Gran Bretaña
PCM Energy	*http://www.teappcm.com/*	India
Rubitherm	*http://www.rubitherm.de/*	Alemania
BASF (Micronal)	*http://www.micronal.de/*	Alemania
Dupont (Energain)	*http://energain.co.uk/*	Gran Bretaña
Dörken (Deltacool)	*http://www.doerken.de/bvf-en/produkte/pcm/index.php*	Alemania
Climator	*http://www.climator.com/en/home/*	Suecia
Cristopia	*http://www.cristopia.com/*	Francia
Microtek	*http://www.microteklabs.com/phasechange.html*	EEUU
Phase Change Products Pty Ltd (PCP)	*http://www.pcpaustralia.com.au/index.html*	Australia
Salca	*http://www.salcabv.nl/*	Holanda
SGL	*http://www.sglgroup.com/*	Alemania
Datum Phase Change Ltd	*http://datumphasechange.com/index.php?home*	Gran Bretaña

especializan bien en parafinas (Rubitherm), bien en sales hidratadas (EPS, PCMEnergy, etc.). La cantidad y variedad de materiales de cambio de fase disponibles a distintas temperaturas en el rango de 18-45ºC es muy amplia. Sin embargo, no todos los PCMs comercializados consiguen el mismo nivel de estabilidad y fiabilidad en uso.

7.2 PCMs microencapsulados

Los PCMs microencapsulados son una excelente alternativa para el manejo e incorporación de materiales de cambio de fase en materiales de construcción.

La microencapsulación consiste en dispersar el material PCM formando partículas micrométricas, las cuales son "atrapadas" por un polímero que las rodea individualmente formando de este modo una cápsula en derredor de cada partícula [20]. El polímero es impermeable y forma un recubrimiento estanco que impide al PCM salir de la cápsula cuando se transforma en líquido. Existen varios procesos de microencapsulación, siendo una tecnología polimérica disponible, no compleja ni excesivamente costosa. Si bien en principio es posible fabricar microencapsulados de PCMs poliméricos y de PCMs inorgánicos, en el momento actual la oferta disponible de materiales microencapsulados es muy limitada. Básicamente consiste en dos parafinas comercializadas por BASF, de cambio de fase a 23ºC y a 25ºC, registradas bajo el nombre de Micronal. La Fig. 8 muestra varias imágenes de este material. Hay un amplio número de investigaciones y productos desarrollados con Micronal, [21,22], si bien es escasa aún la información del comportamiento frente al ciclado térmico a largo plazo.

En el año 2007 se formó una nueva compañía, de nombre Capzo, productora de sales hidratadas microencapsuladas, comercializadas por la compañía Salca (Holanda) bajo el nombre registrado de Thermusol.

El conocimiento y las experiencias con Thermusol son muy escasos en el momento actual, requiriéndose estudios que demuestren su buen funcionamiento, especialmente concerniente a la estabilidad en el ciclado térmico y a la integridad del encapsulado en las repetidas fusiones-solidificaciones de las sales.

Los PCMs microencapsulados son costosos en comparación con la materia prima sin encapsular, pero la sencillez que permiten en la manipulación, y la fácil integración en materiales tradicionales, han conducido a que Micronal sea el PCM actualmente mas empleado industrialmente.

7.3 PCMs macroencapsulados

Un modo sencillo de emplear PCMs es introduciéndolos en contenedores de diversos tamaños y tipos, desde pequeñas bolitas hasta grandes cajas (bolsas selladas, cajas, esferas, etc.). Se conocen como macroencapsulados de PCM. La Fig. 9 muestra algunos de los formatos habituales.



Fig. 8. Las imágenes superiores corresponden a Micronal (slurry y polvo). Las imágenes inferiores muestran las cápsulas poliméricas en cuyo interior se encuentra la parafina. (Imágenes e información propiedad de Micronal –BASF: *http://www.micronal.de/*)

El uso de estos macroencapsulados puede ser muy diverso, dependiendo del desarrollo que cada empresa realice. Generalmente se emplean situados en zonas concretas, tales como por ejemplo falsos techos, o forman parte de instalaciones (intercambiadores de calor) para actuar como sistemas de almacenamiento térmico activo.

Son varias las empresas que ofertan macroencapsulados. Los formatos son muy diversos, desde bolsas aluminizadas conteniendo alrededor de 1kg de PCM (Climator), a perfiles de aluminio o "losetas" poliméricas huecas de distintos tamaños que contienen PCM (Delta), hasta las esferas metálicas huecas rellenas con PCM (Cristopia). Incluso hay disponibles "blisters" de PCM. Se denomina así al tipo de envoltorio que emplea la industria farmacéutica para el suministro y venta de pastillas de medicamentos. En este caso, en vez de pastillas medicinales se incluyen trozos de PCM.





Fig. 9. Bolsas, placas y otro tipo de contenedores en cuyo interior se encuentra contenido un PCM. Son un modo cómodo y habitual de encapsular los materiales de cambio de fase para permitir su uso en construcción. Fuente propia.

7.4 Productos de construcción que contienen PCM

Son varias las empresas cuyo negocio es el suministro de sistemas o materiales de construcción que contienen incorporado el PCM de uno u otro modo. Sin duda, éste es el grupo más amplio de suministradores relacionados con los materiales de cambio de fase. La gran mayoría de productos están destinados al interior del edificio, no existiendo prácticamente ningún producto comercial con PCM destinado al exterior. Así, cabe citar los siguientes:

Los productos más sencillos y directos son sin duda aquellos que combinan los PCMs con materiales tradicionales para el acabado interior de paredes y techos. La compañía Knauf en Alemania (*http://www.knauf.de*), comercializa un producto para divisiones interiores denominado Knauf PCM Smart Board. Son paneles prefabricados de base yeso, que contienen el PCM microencapsulado Micronal de Basf. Hay un software específicamente desarrollado para planificar y simular edificios con estos paneles, recomendado por el fabricante. El software lo distribuye la empresa Valentin (*http://www.valentin.de*) y se llama PCM Express.

En España, la compañía Beissier (http://*www.beissier.es*) de Pasaia, Gipuzkoa, ha desarrollado un material que puede emplearse bien para complementar estos paneles de Knauf, bien para producir un revoco a los cerramientos interiores. El desarrollo está patentado, y el nombre del material está registrado como Termiplast. Este material contiene alrededor de 10-15% de Micronal, y se aplica como un material tradicional de acabado. Se puede ver una ilustración de su modo de aplicación en la Fig. 10.



Fig. 10. Modo de aplicación del mortero con PCM.
(Imagen propiedad de Micronal –BASF*: http://www.micronal.de/*)

La empresa Saint Gobain*(http://www.saint-gobain.com)*, asimismo, ha lanzado al mercado un material de revoco preparado para ser aplicado mediante gunitado (rociado, proyección) denominado Weber.mur clima, el cual consiste en una base de escayola con Micronal. Adicional a este material, también suministran el denominado Maxit Clima, consistente en un mortero de aplicación en seco. La mezcla se proyecta sobre las superficies mediante maquinaria, de esta manera se pueden emplear diferentes espesores. La Figura 11 muestra dos fotografías de estos dos productos en los cuales se ha incorporado Micronal.

Otras compañías han desarrollado sistemas que permiten la incorporación de PCMs de un modo sencillo en rehabilitaciones de edificios. Un buen ejemplo es el sistema denominado Energain, que Dupont comercializa (*http://energain.co.uk/).* Consiste en ligerísimos paneles de aproximadamente 1m^2 de superficie y 5 mm de espesor, en cuyo interior se encuentra el PCM atrapado en una masa polimérica. Los paneles están acabados por dos finas láminas de aluminio. El PCM que contiene Energain es una parafina (60%) estabilizada con un copolímero (40%) para que en el estado líquido el PCM no fluya fácilmente. La Fig. 12 muestra imágenes de este material. El producto, "funciona" del siguiente modo:

- La parafina que contiene es sólida hasta 18ºC, donde comienza la fusión.
- Esta parafina tiene un rango sólido-líquido de 5K: desde 18ºC hasta 22ºC. Es decir, comienza a absorber calor de fusión a 18ºC y termina la fusión a 22ºC.
- El copolímero nos asegura que la cera está estabilizada en su interior mientras es líquida.

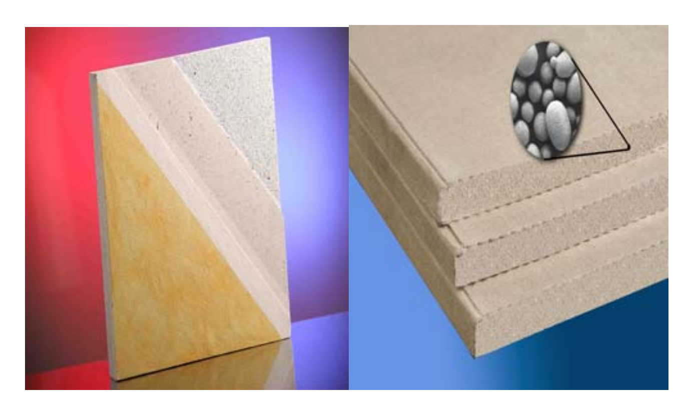


Fig. 11. Las imágenes muestran dos productos comerciales producidos con Micronal. A la izda., escayola cargada con Micronal producida por Saint-Gobain Weber. A la derecha, placas de escayola preformadas (Maxit) *(*Imágenes e información propiedad de Micronal –BASF- *http://www.micronal.de/)*

El proceso de fabricación está patentado y registrado por Dupont. Los tableros de Energain se pueden cortar con un sencillo *cutter*, se instalan con taladros y herramientas y procedimientos tradicionales simples. Los paneles pueden ser colocados sobre la cara interior de fachadas, en cerramientos interiores, o en el techo bajo cubierta, tras lo cual se requiere de un acabado con placas de escayola u otro sistema tradicional de acabado de interiores, para garantizar la integridad del producto.

Los estudios realizados con este material durante tres meses de verano, invierno y primavera fueron presentados en el *Climate Change Seminar 2008*, y se pueden consultar en [23]. Los resultados muestran que las temperaturas pico de verano en un ático recubierto con este material se reducen en torno a 5-6ºC, si bien un sistema de ventilación debe existir durante la noche para garantizar la descarga del PCM. El ahorro obtenido en refrigeración para un volumen de 68 m^3 fue de 8.2 kWh/día. En invierno, la necesidad de calefacción nocturna se reduce en una media de 2-3h diarias.



Fig. 12. Energain consiste en paneles en cuyo interior se encuentra un material de cambio de fase atrapado por un copolímero "gomoso". Las superficies del panel son finas láminas de aluminio. La manipulación e instalación son extremadamente sencillas.
(Imágenes e información propiedad de DuPont Energain *http://energain.co.uk/)*

7.5 Otros Productos con PCM para el sector de edificación

La variedad de posibles productos a desarrollar es muy grande, pero los productos actualmente ofertados de modo comercial es más limitada.

Tanto Salca como Rubitherm producen granulados infiltrados con PCM, útiles para suelos radiantes. Se trata de materiales de soporte (inorgánicos u orgánicos), que han sido infiltrados con PCM, y que se mantienen dentro de los poros en el estado líquido por capilaridad. La oferta en cuanto a las temperaturas de los materiales de cambio de fase en estos granulados es muy grande y variada. La mayor limitación que presentan es su baja capacidad real de almacenamiento térmico ya que más del 50% del material es soporte, no PCM. La empresa Rubitherm, además, oferta también paneles fibrosos, de apariencia celulósica, infiltrados con PCMs parafínicos que pueden servir para diversas aplicaciones constructivas.

En general, la mayoría de los suministradores ha desarrollado macroencapsulados específicamente destinados a instalaciones de climatización de aire. Rubitherm produce placas rígidas de aluminio, sin diseñar o especificar ningún producto concreto en el que puedan ser integradas.

Dörken ha desarrollado un sistema denominado DeltaCool. El mismo consiste básicamente en un PCM de sal hidratada que cambia de fase entre 22ºC y 28ºC, el cual está macroencapsulado en losetas rígidas poliméricas, de tamaño y forma adecuados para colocar sobre las losetas de falsos techos. Dörken informa que ha hecho ensayos de ciclado térmico y que el material no se degrada en 10.000 ciclos, el equivalente a 25 años de funcionamiento a 1 ciclo diario.

Además de ellos, la empresa SGL comercializa un producto denominado Ecophit, basado en Grafito expandido infiltrado con PCMs. SGL es una empresa especializada en grafito y productos fabricados con este material. El producto que comercializan se suministra: en forma de gránulos de grafito expandido infiltrado con PCM, en placas de grafito fabricadas con este material, en

placas de escayola mezclada con los gránulos, etc. Son capaces de infiltrar una variedad muy grande de distintos PCMs dentro de los gránulos de grafito, por lo cual es posible disponer del material a casi cualquier temperatura entre 0ºC y 250ºC. La característica más relevante que presenta Ecophit es la excelente conductividad térmica que proporciona el grafito, por lo cual es muy adecuado para sistemas activos de acondicionamiento de aire.

Por último, la empresa Datum Phase Change Limited ha lanzado recientemente al mercado dos productos que incorporan PCMs, ambos para su empleo en edificación. Se trata de las aplicaciones RACUS® and F.E.S-Board®. El primero de ellos consiste en un sistema de placas con PCM, orientado a la aplicación como falsos techos, mientras que el segundo de ellos se puede emplear a modo de particiones en el interior de edificios. Más información e imágenes en: *http://datumphasechange.com/index.php?home*.



Fig. 14. Sede de SARL Busipolis company, en Metz (Francia), en cuyo interior se instaló DuPont™ Energain®.
(Extractado de*: http://energain.co.uk)*



8. Proyectos realizados con PCMs

Hay un buen número de edificios en los cuales se han realizado proyectos innovadores. La mayoría han sido realizados como demostradores, o formando parte de una investigación.

DuPont ofrece una buena variedad de proyectos en los cuales se ha empleado su material Energain con el fin de dotar de cierta masa térmica a los edificios. Los más emblemáticos se resumen en la Tabla 5. Las Figuras 13 a 15 muestran imágenes de los edificios de algunos de estos proyectos. Se puede encontrar información más detallada en la página web de Dupont Energain: *http://energain.co.uk*.



Fig. 15. Villa privada en Prague (República Checa).
(Fotografía e información extractados de *http://energain.co.uk*)



Fig. 13. The iCon Innovation Centre en Daventry, UK. En su interior se ha instalado DuPont™ Energain® como masa térmica. Proyecto de Consarc Architects.
(Fotografía y derechos propiedad de Andrew Hatfield. Extractado de *http://energain.co.uk)*



Fig. 15. Villa privada en Prague (República Checa). En su interior se ha instalado DuPont™ Energain® en techos.
(Fotografía e información extractados de *http://energain.co.uk*)

Tabla 5
Proyectos en los cuales se ha incorporado DuPont Energain
(Información extraída de *http://energain.co.uk/Energain/en_GB/references/index.html*)

Tipo de edificación	*Denominación*	*Localización*	*Objetivo perseguido con el PCM*
Edificios de Oficinas	iCon	Daventry, UK	BREEAM Excellent project. Masa Térmica
	North West Housing Services	Liverpool, UK	Masa Térmica en un ático para transformarlo en oficinas
	Grand Lyon community	Vénissieux, France	Eliminación del sistema de aire acondicionado
	Busipolis	Metz, France	Masa Térmica en un edificio de oficinas
Casas residenciales	Zero carbon family dwelling	Staplehurst, Kent, UK	Masa Térmica en un edificio cero-carbono.
	Green Frame House	Italy	Masa Térmica para transformar contenedores de transporte por mar en viviendas
	Private Villa	Prague, CZ Republic	Villa privada en Praga
	Loft Privado	Luxemburgo	Loft privado en Lyon
Escuelas/ Universidades	Edinburgh Napier University campus	Edinburgo (Escocia)	Masa Térmica en el nuevo campus universitario de Edinburgh Napier University
	Hamond High School	Swaffham, Norfolk	En Hamond High school (Swaffham, Norfolk, UK) se instalaron 600 m² de DuPont™ Energain® en los techos de las nuevas aulas
	Escuela de Vaires	Vaires sur Marne, France	Instalación de DuPont™ Energain® en el comedor de una escuela en Vaires sur Marne (Francia)

Tabla 6
Proyectos en los cuales se ha incorporado Micronal (BASF)
(Información extractada de *http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290872*)

Tipo de edificación	*Denominación*	*Objetivo perseguido con el PCM*
Viviendas de bajo consumo energético	LUWOGE low-energy house, Ludwigshafen	Escayola mezclada con Micronal® para reducir la temperatura pico en verano
	"Sodastrasse 40" pilot project, Ludwigshafen	Uso de Micronal® PCM SmartBoard™ a gran escala para desarrollar un bajo consumo energético
Oficinas	DSC service centre, Ludwigshafen	Micronal insertado en placas porosas para el techo con el fin de tener un control climático pasivo
	Badenova building, Offenburg	Las paredes interiores están recubiertas con “Maxit clima wall plaster” modificado by Micronal®
	Berlin - project on the Spree	Micronal insertado en placas porosas para el techo con el fin de tener un control climático pasivo
	Haus der Gegenwart, Munich	Uno de Micronal® PCM SmartBoard™ como parte de proyecto de ventilación pasiva
Escuelas/Universidades	Hölderlin Grammar School, Lauffen am Neckar	500 m² empleado en las paredes de las aulas. La edificación es de tipo ligero
	Nordstadt Lysee, Diekirch, Luxemburgo	Edificación de construcción ligera con 4500m^2 de Micronal® PCM SmartBoard™ para ayudar mantener la temperatura de confort interior

Asimismo, BASF muestra un buen número de proyectos realizados con Micronal, todos ellos radicados en Alemania. La tabla 6 recoge los proyectos referenciados por la compañía. Las Fig. 16 y 17 muestran algunas imágenes de los edificios referenciados en la Tabla 5.




Fig. 16. Edificios de oficinas en cuya ejecución se ha incluido Micronal. Dcha, Berlin - project on the Spree e izda., Haus der Gegenwart, Munich. (Imágenes e información extractadas de *http://www.micronal.de/*)



Fig. 17. Edificio "Nordstadt Lysee" en Diekirch, Luxembourg. (Imágenes e información extractadas de *http://www.micronal.de/*)

8. Conclusiones

Los Materiales de Cambio de Fase (PCMs) almacenan la energía mediante el mecanismo de calor latente. La aplicación de este tipo de materiales en edificios puede contribuir a mejorar la eficiencia energética de los mismos, debido, principalmente, a dos motivos: (i) mayor densidad de almacenamiento térmico frente a los materiales de construcción tradicionales, lo que supone un incremento de la inercia térmica y (ii) almacenamiento de la energía a una temperatura dada, que permite evitar sobrecalentamientos o sobreenfriamientos indeseados en el interior.

Las investigaciones realizadas hasta ahora sobre su uso en construcción demuestran la existencia de un elevado potencial de ahorro energético. Se han realizado análisis muy diversos, entre los que se encuentran casos de estudio prácticos en edificios reales. Los resultados muestran la viabilidad de la aplicación de este tipo de materiales en edificación, así como el ahorro energético que supone su empleo. Se han desarrollado, asimismo, algunos productos comerciales con soluciones constructivas que incluyen PCMs. No obstante, el desarrollo industrial de los mismos es aún muy bajo, lo que hace que su disponibilidad sea limitada y su precio todavía elevado.

Son necesarias por tanto investigaciones en la materia, que permitan avanzar en el desarrollo de los materiales, mejorar su comportamiento y fomentar su uso generalizado en edificación, para contribuir a una mayor eficiencia energética.

Glosario

Calor sensible: aquel que se almacena en un material elevando la temperatura del material de almacenamiento, pero sin afectar a su estado (solido, líquido o gaseoso).
Calor latente: es aquel asociado a las transformaciones de fase. Es el calor que debe emplearse para que un material de masa dada cambie completamente de estado.
Inercia Térmica: propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que la cede o absorbe del entorno. En edificación su uso adecuado puede contribuir a minimizar el uso de sistemas de calefacción y/o refrigeración.
Materiales de Cambio de Fase: son aquellos materiales que se emplean para el almacenamiento de calor en forma de calor latente de fusión/ solidificación. Permiten una mayor densidad de almacenamiento térmico frente al almacenamiento por calor sensible, lo que puede aportar inercia térmica en construcciones ligeras y/o evitar sobrecalentamientos excesivos del interior del edificio.

Bibliografía

[1] G.A. Lane, Solar Heat Storage. Latent Heat Material. Volume I, CRC Press, United States, 1983.
[2] A. Abhat, Low-Temperature Latent-Heat Thermal-Energy Storage - Heat-Storage Materials, Solar Energy 30 (1983) 313-332.
[3] M.M. Farid, A.M. Khudhair, S.A.K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management 45 (2004) 1597-1615.
[4] H. Mehling, L. Cabeza, Heat and Cold Storage with PCM. An Up to Date Introduction into Basics and Applications, Springer, Berlin, 2008.
[5] K. Murat M., High-temperature phase change materials for thermal energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 955-970.
[6] A. Sarı, C. Alkan, A. Biçer, A. Karaipekli, Synthesis and thermal energy storage characteristics of polystyrene-graft-palmitic acid copolymers as solid–solid phase change materials, Solar Energy Materials and Solar Cells 95 (2011) 3195-3201.
[7] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1675-1695.
[8] A.D. Solomon, Design criteria in PCM wall thermal storage, Energy 4 (1979) 701-709.
[9] S. Cantor, DSC Study of melting and solidification of salt hydrates, Thermochimica Acta 33 (1979) 69-86.
[10] M. Telkes, Nucleation of supersaturated inorganic salt solutions, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 44 (1952) 1308-1310.
[11] W. D. Callister, Introducción a La Ciencia e Ingeriería De Los Materiales, Editorial Reverté S.A., Barcelona, 2007.
[12] D. R. Askeland, Ciencia e Ingeriería De Los Materiales, International Thomson Editores, Mexico, 1998.

[13] L. Fan, J.M. Khodadadi, Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 24-46.

[14] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1373-1391.

[15] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 251-283.

[16] M. Hadjieva, S. Kanev, J. Argirov, Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage, Solar Energy Materials and Solar Cells 27 (1992) 181-187.

[17] J.A. Orosa, A.C. Oliveira, A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment, Renewable Energy 37 (2012) 89-96.

[18] M. Hadjieva, R. Stoykov, T. Filipova, Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage, Renewable Energy 19 (2000) 111-115.

[19] T. Lee, D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells 62 (2000) 217-237.

[20] V.V. Tyagi, S.C. Kaushik, S.K. Tyagi, T. Akiyama, Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1373-1391.

[21] C. Castellón, M. Medrano, J. Roca, L.F. Cabeza, M.E. Navarro, A.I. Fernández, A. Lázaro, B. Zalba, Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, Renewable Energy 35 (2010) 2370-2374.

[22] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, Energy and Buildings 39 (2007) 113-119.

[23] M. Saunders, Strategies for reducing overheating in lightweight buildings with phase change materials, Climate Change 2008, recuperado el 9 de febrero de 2012 de, *http://energain.co.uk/Energain/en_GB/assets/downloads/seminar/climate_change_seminar_phase_change_material.pdf*

El Vidrio en la Arquitectura
Glass in Architecture

José Pablo Calvo Busello [a*]

[a] *Arquitecto. Cristalería Española, S.A., Dirección Técnica General, (1973-1991) y Asesoría de Vidrios y Fachadas, C.I.T.A.V. (1991-2011)*

Resumen

El vidrio ha sido el material tradicional para iluminar nuestras estancias y comunicarnos visualmente con el exterior desde que, en el S.XII el Gótico rasgó las pesadas estructuras románicas y abrió los muros a los vitrales y, posteriormente, a finales del S.XIX y en el S.XX las estructuras ligeras de hierro forjado y de acero combinadas con vidrios permitieron realizar fachadas totalmente acristaladas.
Esta preeminencia del vidrio sobre el resto de materiales, le trasladó problemas que hasta ese momento solucionaban ellos, fundamentalmente aislamiento térmico, en zonas frías, y protección solar, en las cálidas, y sin olvidar sus prestaciones fundamentales de transparencia y transmisión luminosa. Es fundamental conocer qué es el vidrio, cómo lo empleamos, para poder hacer un uso racional de él y obtener la mayor comodidad evitando los problemas secundarios, como recalentamiento indeseado o roturas térmicas, que pueden ocasionarse por su uso inadecuado. Una acertada elección del vidrio ayuda a reducir el consumo y destruir menos Naturaleza por explotación de recursos, y como consecuencia se reducirán también las emisiones y contaminaremos menos.

Palabras clave: Vidrio, Qué, Cómo, Térmica, Solar, Recalentamiento, Roturas.

Abstract

The glass has been the traditional material to illuminate our rooms and visually communicate with the outside world from that in the twelfth century Gothic structures tore the heavy walls and opened the windows and then at the end of XIX and S.XX structures in light of wrought iron and steel combined with glass allowed for fully glazed facades. This preeminence of the glass on the other materials, we moved so far problems they solved, mainly thermal insulation in cold areas, and sun in the warm, and not forgetting its fundamental benefits of transparency and light transmission. It is essential to know what glass is, how we use it, to make rational use of it and get the comfort avoiding secondary problems such as unwanted or broken thermal overheating, which can result from improper use. A judicious choice of the glass helps to reduce fuel consumption and less destroy nature for resource exploitation, and consequently will also reduce emissions and pollute less.

Keywords: Glass, What, How, Thermal, Solar, Overheating, Breaks.

---

1. Introducción

El Vidrio, un material utilizado por el hombre desde hace varios miles de años, prácticamente desde finales del Paleolítico Superior, en su forma natural de obsidiana, vidrio volcánico generado por rocas eruptivas nacidas de los magmas que surgen del manto superior de la tierra y que por enfriamiento rápido no llegan a cristalizar, y las escasamente utilizadas tectitas provenientes de impactos de meteoritos sobre la Tierra en el Cenozoico durante el período comprendido entre mediados del Terciario y del Cuaternario.

La obsidiana por su característica fractura con bordes concoideos muy cortantes (Fig.1), como vidrio que es, fue muy utilizada para la elaboración de armas y utensilios fundamentalmente en el Centro y Sur de América, donde era muy abundante, por las civilizaciones precolombinas (mayas, mejicas e incas) como sustituta del silex (Fig.2).

Además de su uso como herramienta, la obsidiana se empleó, por su brillo y aptitud para el pulimento, en la elaboración de piezas artísticas siendo denominada en Perú espejo de los incas.

* 648009617b@gmail.com

Citar como: Calvo Busello, J. P. (2012). El Vidrio en Arquitectura. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 147 – 183). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU



Fig. 1. Cuchillo ceremonial de *obsidiana.*

Mucho tiempo después con la aparición de la alfarería y la metalurgia, probablemente asociada a ésta última y derivada de la fundición de objetos en molde de arena, se descubrió en época y zona desconocidas con seguridad la forma de elaborar ese material ambiguo desde su origen, transparente como el agua pero rígido como la piedra, frágil y cortante como un cuchillo.



Fig. 2. Vasija con forma de mono. Cultura Mexica S.XIV-XVI (d.C.). (El Museo Nacional de Antropología. Edición AG. México D.F.).

En las siguientes páginas recorreremos el camino de la historia del vidrio buscando respuestas a algunas preguntas sobre este material de las que esbozamos algunas muy simples a modo de guía:

- ¿QUÉ?… es el vidrio como material, cómo se obtiene, de qué se compone, cuáles son sus características físicas, mecánicas y térmicas. Entre muchas acaso la más sugestiva definición sea líquido de viscosidad infinita… así de sencillo.
- ¿PARA QUÉ?… lo empleamos en Arquitectura y como entró en ella. *Para iluminar nuestras estancias*, para crear espacios inmateriales sugeridos por la luz y *para relacionarnos visualmente con el exterior*.
- ¿CÓMO?… lo hemos utilizado y cómo debemos hacerlo en el futuro, en qué aplicaciones, con qué precauciones. El vidrio ha pasado, en los últimos tiempos y en multitud de ocasiones, de ser *un relleno necesario* en un marco a *cerramiento único y absoluto, única barrera entre interior y exterior, utilizado muchas veces con excesiva profusión y un punto de frivolidad llegando a olvidar su función primordial, la transmisión de luz*. En el futuro deberemos valorar con criterio la Estética, Necesidad, Ventajas e Inconvenientes de su uso para llegar a las soluciones más adecuadas, que no tienen por qué ser las de *moda* en el momento.

2. ¿Qué es el vidrio?

Físicamente el vidrio pertenece al grupo de los líquidos *subenfriados* [1] con las siguientes características generales, entre otras:

- Carece de estructura cristalina (nunca debe llamarse al vidrio "cristal" aunque en lenguaje coloquial sea muy frecuente).
- Carece de punto de fusión definido.
- Presenta una transición reversible entre los estados líquido y rígido sin fases cristalinas.
- Es termodinámicamente inestable.
- Macroscópicamente es isótropo.
- Presenta ordenación estructural de corto alcance y desorden estructural remoto.
- Se encuentra, *subenfriado*, en estado de desequilibrio.
- Posee mayor energía interna que un estado cristalino.

De estas características se deduce que nos encontramos ante una sustancia estructuralmente desordenada que no responde a leyes cristalográficas o termodinámicas por lo que los vitroides pueden considerarse un estado excepcional de la materia llegando en tiempos a definirse como un cuarto estado de la misma con rigidez de sólido y estructura de líquido.

Su comportamiento térmico, comparado con un sólido cristalino, se presenta en la Fig. 3 [1].

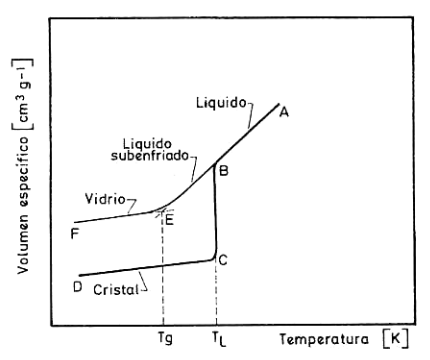


Fig. 3. Comportamiento térmico de un sólido vítreo y otro cristalino. [1] EL VIDRIO Capítulo 2.

Partiendo del estado líquido (A), al descender la temperatura de ambos hasta el valor T_L (B), el sólido cristalino experimenta una reducción prácticamente inmediata de su volumen específico pasando al estado sólido cristalizado (C), es decir el material posee un punto de fusión (enfriamiento) concreto con una claro aumento de su densidad, es decir en el tramo A-B es líquido y en el C-D sólido sin posiciones intermedias.

Sin embargo, el vitroide en el mismo punto (B), y sin variar de estructura ni densidad de forma apreciable, comienza a incrementar su viscosidad de manera que al llegar a la temperatura T_g (E) ha llegado al estado rígido (viscosidad máxima) pero sin variación de estructura, es decir en el tramo de enfriamiento A-B es líquido, en el tramo B-E, denominado *intervalo de transición*, coexisten

fases líquidas con otras de viscosidad creciente que se van incrementando hasta alcanzar la rigidez a partir del punto E en el que la viscosidad alcanza su valor máximo entre 10^{13} y $10^{13'5}$ dPa s.

En cuanto a su composición, podríamos referirnos como guía al relato de Plinio el Viejo en su *Naturalis Historia* en la que narra como unos comerciantes fenicios vararon su barco para pernoctar en la desembocadura de un río de Siria, el Belus actualmente Naaman, de aguas turbias lentas y cenagosas que al bajar la marea descubría un lecho de arenas limpias y brillantes sobre las que colocaron unas piedras de *trona* (carbonatos y bicarbonatos sódicos naturales), objeto de su comercio, para cocinar su cena. Encendido el fuego observaron que la *trona* y las arenas del lecho del río se fundían produciendo un líquido transparente que dio origen al vidrio (Fig.4).

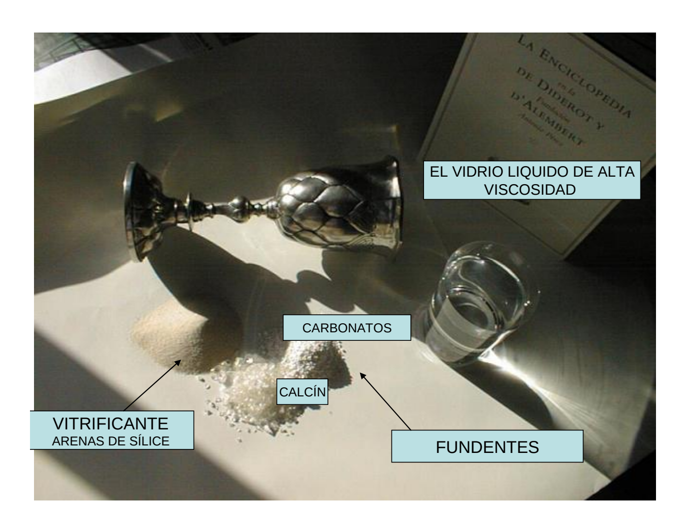


Fig. 4. Materiales que componen el vidrio y Propiedades Básicas.

Si bien el relato merece un crédito histórico muy cuestionable pues, antes del establecimiento de los fenicios en la costa de Siria, egipcios y sirios (2500 a.C.) producían ya piezas de vidrio en sus talleres, tiene una validez técnica innegable como vamos a ver.

Gran narrador y divulgador científico Plinio el Viejo, por cierto muerto en la erupción del Vesubio probablemente por emanaciones sulfurosas al dejarse llevar por su inquietud investigadora para presenciar la erupción en peligrosa proximidad, haría buena la frase "la menor distancia entre un hombre y la verdad es un cuento" pues el relato anterior nos facilita, a través de un bello cuento, los datos básicos sobre la composición del vidrio: *Arena del lecho de un río, carbonatos, fuego (…).*

En la imagen y los dos cuadros siguientes se idealizan, en la primera (Fig. 4) y detallan, en los segundos (Fig.5) los elementos que componen el vidrio y sus propiedades básicas:

COMPOSICIÓN BÁSICA DEL VIDRIO PLANO SODOCÁLCICO DE USO HABITUAL EN DE EDIFICACIÓN

GRUPO PRINCIPAL	Porcentaje	MATERIA PRIMA
VITRIFICANTES: También llamados **formadores de red** vítrea, su función es dar estructura fundamental al vidrio y su calidad determina la espectrofotometría, y las propiedades térmicas y mecánicas fundamentales del producto final.	72-75%	.- **Arenas de cuarzo, de origen sedimentario** En función de su calidad y pureza se obtienen vidrios de coloración más natural, menos verdosos por tener menor contenido de óxido de hierro (Fe_2O_3) que en los vidrios planos ordinarios de edificación se encuentra entre 0'030-0'050%, y para los denominados "extraclaros" entre 0'015-0'020%. En Europa se encuentran arenas de gran calidad para la fabricación de vidrio plano en Dörentrup y Hohenbocka, entre el Elba, y el Weser, Nemours y Fontinebleau en Francia y en la región de Mol en Amberes, Bélgica.
FUNDENTES: Es el grupo que favorece la formación del vidrio, rebajando la temperatura de fusión del vitrificante y también se denominan **modificadores de red.** .- Los mejores son los óxidos alcalinos y entre todos el de sodio.	20-22%	.- **Carbonatos y sulfatos, de sodio y de calcio.** .- **Óxidos de potasio litio y magnesio.** También se emplea como fundente el propio vidrio molido, que en argot vidriero se denomina **calcín,** aunque para vidrio plano solo se emplea el del mismo horno pues aportar calcín de un horno diferente producirá defectos y alteraciones de la calidad de producto final. En este sentido podría decirse que el vidrio de cada horno tiene "grupo sanguíneo".
ESTABILIZANTES: Su función es la de modificar algunas características del vidrio sin alterar la estructura de su red, pero facilitando su formación. COMPONENTES SECUNDARIOS: En este apartado se sitúan aquellos componentes que, en cantidad minoritaria, se usan para funciones determinadas, colorear, decolorar … … etc	3-6%	.- **Materiales aluminosos**: Óxido e hidróxido de aluminio, feldespatos, caolines y rocas aluminosas. .- **Óxido de plomo**, que es uno de los materiales que más ennoblece al vidrio pues aporta brillo, sonoridad y "blancura" al vidrio (en algunos vidrios destinados a la fabricación de copas o vajilla el plomo puede alcanzar porcentajes superiores al 25%) ===//=== .- **Fluoruros**, mediante criolita, fluosilicato sódico, espato de fluor, fluoruro sódico… etc. para opacificificaciones. .- **Óxidos** para coloración intencionada.

PROPIEDADES COMUNES DE LOS VIDRIOS SODOCÁLCICOS DE USO HABITUAL EN EDIFICACIÓN
(Para vidrio incoloro de 10 mm de espesor)

PROPIEDADES ÓPTICAS		
Índice de refracción	$n = 1'52$	
Transmisión Ultravioleta	$T_{UV} = 44\%$	Para 310 nm $\leq \lambda \leq$ 360 nm
Transmisión Luminosa	$TL = 86\%$	Para 360 nm $\leq \lambda \leq$ 760 nm
Transmisión Infrarroja (corta)	$T_{IR,corta} = 44\%$	Para 760 nm $\leq \lambda \leq$ 2.500 nm
Transmisión Infrarroja (larga)	$T_{IR,larga} = 0$	Para $\lambda >$ 5.000 nm
Factor Solar	$g = 0'77$	Según UNE-EN 410
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Densidad	$\gamma = 2'5$ kg/dm^2	
Dureza (escala Mohs)	6'5	Entre la ortosa y el cuarzo
Módulo de Elasticidad	$E = 7'3 \times 10^4$ N/mm^2	
Coef. De Poisson	$\nu = 0'22$	
Resistencia a compresión (1)	$\sigma_{C,rec} = 1.000$ N/mm^2	
Resistencia a tracción (1)	$\sigma_{T,rec} = 40$ N/mm^2	Para vidrio recocido
	$\sigma_{T,templ} = 150$ N/mm^2	Para vidrio templado
Resistencia a flexo-tracción (1)	$\sigma_{FT,rec} = 10\text{-}20$ N/mm^2	Para vidrio recocido
	$\sigma_{FT,te}$=120/150N/mm^2	Para vidrio templado
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Calor específico	$C = 0'19$ cal . g^{-1}	
Coef. de dilatación lineal	$\alpha = 8/9 \times 10^6$	
Conductividad térmica	$\lambda = 0'9$ W . m^{-1}. K^{-1}	
Resistencia al choque térmico	$\cong$ 60 K	Vidrio recocido
	$\cong$ 240 K	Vidrio templado
PROPIEDADES ACÚSTICAS		
Velocidad del sonido	5/6 km/s	Equivalente a la del acero
Atenuación acústica	$R_W = 33$ dBA	Según UNE-EN 717-1
	$R_A = 32$ dBA	
	$R_{A,tr} = 31$ dBA	

NOTAS: (1) Las resistencias mecánicas del vidrio dadas en la Tabla corresponden a límites genéricos medios y se estudiarán con más detenimiento en el apartado específico correspondiente.

En las mismas influyen conceptos como tiempo de aplicación de la carga y estado de los bordes del vidrio que aquí n se consideran.

Fig. 5. Materiales que componen el vidrio y Propiedades Básicas.

En cuanto a los procesos de fabricación, dejemos a un lado la historia de los métodos empleados para obtener vidrio plano para la edificación en épocas anteriores y pasemos a describir el sistema actual para su obtención.

En la actualidad el vidrio plano básico para la edificación se fabrica por fusión continua, en un horno de balsa, y posterior flotación en un baño de estaño; de ahí la inserción de la copa de estaño en el esquema simbólico de componentes del vidrio de la Figura 4, este sistema, empleado hoy por prácticamente todos los fabricantes, fue patentado por PILKINGTON BROTHERS en 1952.

El horno de balsa es un elemento de fabricación que deberá fundir vidrio, sin interrupción, durante toda su campaña, llamando así al periodo de tiempo durante el cual el horno es válido para la producción y cuya duración media puede ser de unos 15 a 18 años.

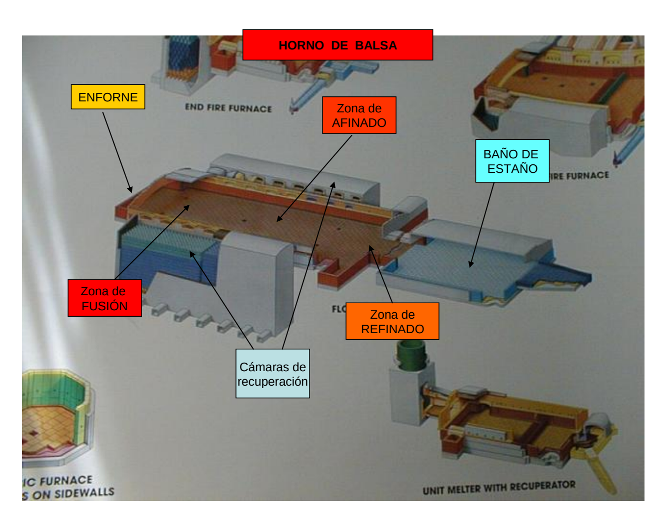


Fig. 6. Horno de balsa para fabricación de vidrio plano.
Catálogo de refractarios SEPR.

Los hornos habituales corresponden al tipo de quemadores transversales y contienen una balsa de vidrio fundido de unos 300 ó 400m^2 de superficie y entre 1,00 y 1,60m de profundidad cuyas partes fundamentales son:

- *Enforne*: boca trasera del horno por la que se introduce la mezcla de composición.
- *Zonas de fusión y afinado:* donde se funde la composición y se depura la masa ya fundida eliminando las impurezas
- *Zona de refinado:* en la que se estabiliza y regula la temperatura (1050ºC) y viscosidad (10^4 dPa s) del vidrio fundido antes de su vertido en el baño (habitualmente definido como “Float”) para transformarlo en lámina de vidrio plano.
- *Cámaras de recuperación:* para el aprovechamiento del aire caliente (850ºC) que se extrae del horno y así reducir los consumos energéticos.

A la salida del *Horno* el vidrio se vierte sobre el estaño de la cámara de flotado donde se desarrolla el proceso fundamental de fabricación.

Por el proceso de flotación se obtendría vidrio de 6mm, que corresponde con el espesor de estabilidad del vidrio sobre el estaño para su viscosidad a 1050ºC (10^4 dPa s), por tanto para obtener otros espesores se recurre a los procedimientos descritos en la Figura 7 [2].

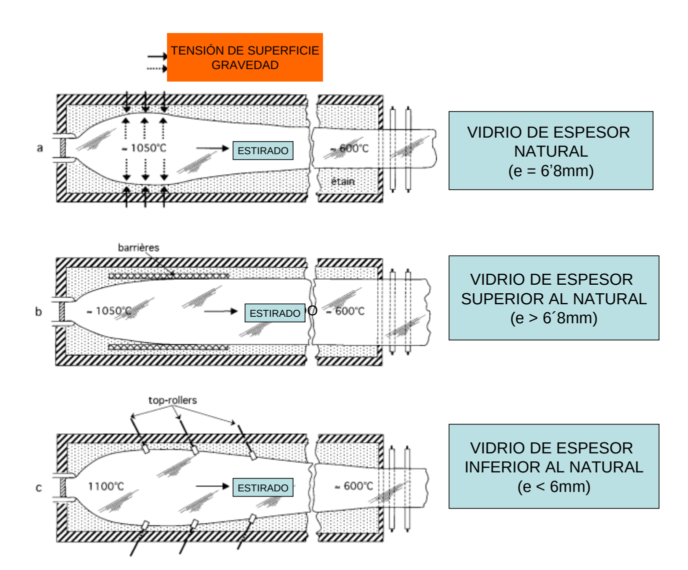


Fig. 7. Técnica de fabricación de los distintos espesores.
[2] LE VERRE Capítulo 7. Fig. 7.26.

Considerando que la producción, en Tn por unidad de tiempo de un horno, debe ser casi siempre la misma con el fin de garantizar las campañas óptimas reduciendo su envejecimiento, la obtención de espesores diferentes a 6mm se consigue empleando *barreras (fender)* en el baño y reteniendo el estirado, para láminas más gruesas, o con *rodillos (Top-rollers)* que traccionan lateralmente la hoja y reducen su espesor acelerando al mismo tiempo su velocidad de extracción para las de menor espesor. Los *Top-rollers* también se emplean en la fabricación de vidrios de espesores mayores de 6mm.

Dentro del baño el vidrio flota sobre el estaño, de mayor densidad, con el esquema de la Figura 8. [2]

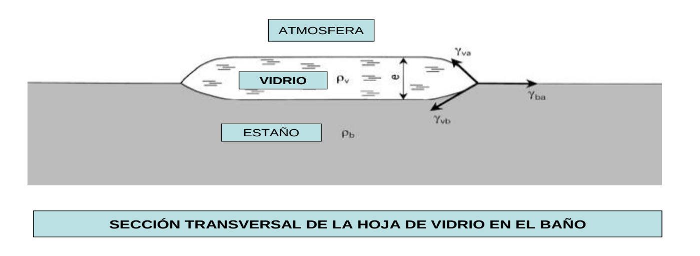


Fig. 8. Acciones sobre el vidrio fundido en el baño.
[2] LE VERRE Capítulo 7. Fig. 7.25.

A la salida del *Float*, con una temperatura de ≈ 600ºC y una viscosidad de 10^{11} dPas comienza el proceso de enfriado y recocido del vidrio, labor que se efectúa en un “arca de recocido”, durante el cual se controlará la temperatura de enfriamiento que si se realizara en

atmósfera libre y natural (Fig. 9) a temperatura ambiente y sin control, dejaría tensiones permanentes en la hoja de vidrio diferentes en sus caras externas y el interior, a causa de la mala conductividad térmica del material, lo que produciría un vidrio de extrema fragilidad y muy sensible a los cambios térmicos, prácticamente inútil para su uso.

Es por consiguiente un proceso delicado que marcará al vidrio para el futuro y determinará muchas de sus propiedades y la buena aptitud para la transformación, corte, pulido de bordes, etc. La velocidad de enfriamiento requiere un control muy estricto y es diferente para cada tipo de vidrio y cada espesor de hoja.

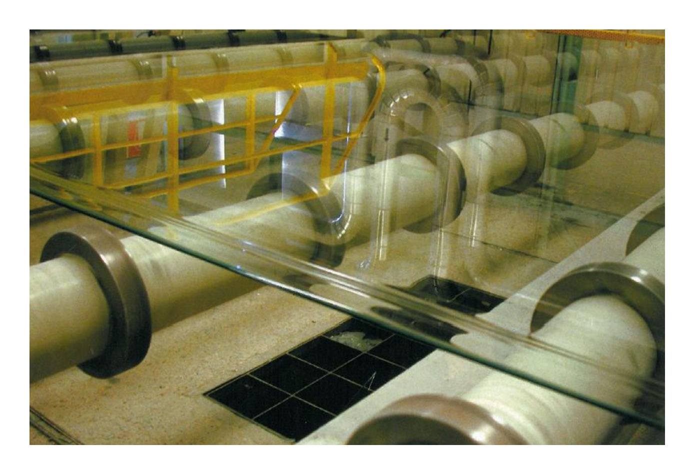


Fig. 9. Hoja de vidrio en la extendería, a la salida del recocido.

Los espesores comerciales de los vidrios base de edificación son: 2’2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19 mm; y la dimensión comercial de las hojas de vidrio obtenido por este procedimiento es de 6000×3210mm y, aunque pueden conseguirse dimensiones de mayor longitud previa consulta a los fabricantes, el ancho es una dimensión fija aceptada internacionalmente por necesidades de transporte.

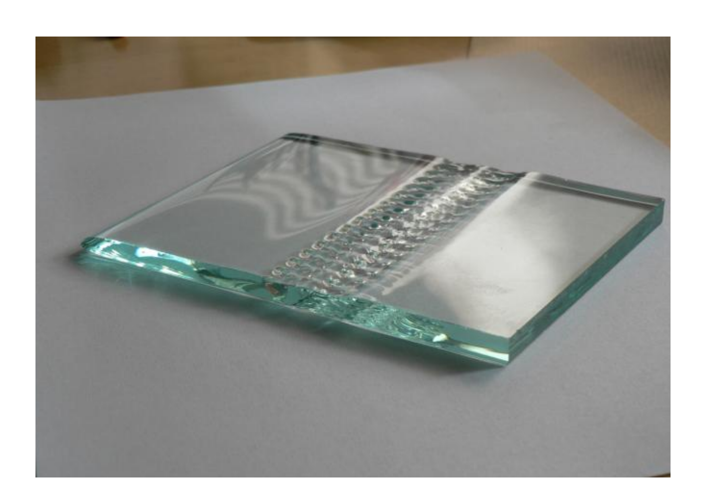


Fig. 10. Detalle de las marcas de los *“Top rollers”*.

El aspecto del vidrio, ya rígido, a la salida del *Arca de recocido* es el de la Figura 9 donde se aprecian las marcas dejadas por los *Top-rollers* en los bordes del vidrio durante el proceso de ajuste de espesores en el *Float*.

Las marcas indicadas se eliminan a la salida de la hoja continua mediante un corte longitudinal automático de los bordes del vidrio bruto en una operación denominada *desbandado*, que debe ser suficientemente ancho para garantizar la eliminación completa de las marcas cuyo detalle se aprecia en la Fig.10.

3. Historia y evolución del vidrio en Arquitectura. Nuevas tendencias.

Desde que el ser humano se hizo sedentario tuvo que generar abrigos que le protegieran del espacio exterior por lo que podemos definir la Arquitectura, desnudándola de cualquier significación dialéctica y llevada a los extremos más básicos, como *la necesidad de generar espacios para desarrollar la actividad humana*, desde las tiendas de piel de camello del desierto a los igloos de bloques de hielo del Ártico. En todos los abrigos se busca una defensa frente a las condiciones climatológicas externas y supuestamente hostiles y luz para desarrollar nuestra actividad.

En esta acotación de espacios existen tres elementos fundamentales:

- *El exterior*, dependiente de las condiciones de climatología del lugar sobre el que no existe control pues depende de la situación del asentamiento, fundamentalmente la Latitud y los consiguientes niveles de soleamiento y temperaturas estacionales, régimen de lluvias del lugar y, en general, de las condiciones climatológicas.
- *El interior* en el que se desean mantener las mejores condiciones de estancia y, por consiguiente, exige unos valores de temperatura, iluminación, y abrigo lo más adecuados para la actividad a desarrollar para los variables regímenes climatológicos exteriores.
- *La frontera* entre ambos, a través de la cual sucederán los intercambios entre los dos anteriores.

En la rama Matemática de la Topología el punto frontera entre dos espacios se define como aquel en cuyo entorno, por pequeño que sea, existen puntos de ambos espacios. Empleando la definición Topológica, *la fachada cerramiento*, *piel* o como queramos definir lo que cierra nuestros espacios habitables, *es el punto frontera entre exterior e interior* y a través de ella se producirá el intercambio entre ambos. En ese punto es donde se sitúa nuestro vidrio y podríamos resumir las necesidades de protección que debe cubrir en el siguiente esquema (Fig.11).

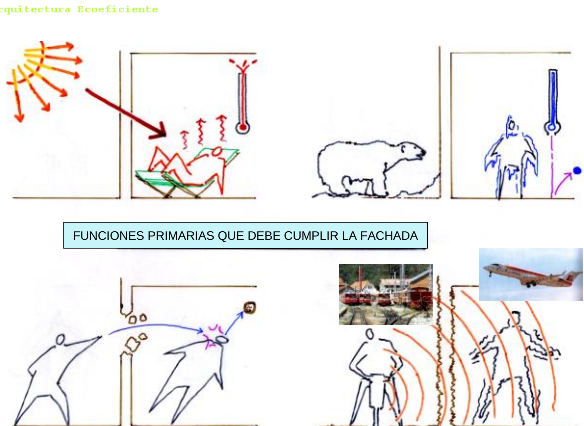


Fig. 11. Condiciones mínimas que debe cubrir una fachada

A estas condiciones de defensa térmica, física y acústica, se une otra fundamental, la que dio entrada al vidrio en nuestros cerramientos: *la iluminación*.

En condiciones subtropicales la radiación solar, luz y calor, es alta aún en estaciones frías y, por consiguiente, las necesidades de huecos externos de iluminación son discretas lo que también beneficia la menor transmisión de calor a través de los mismos pero en zonas septentrionales este efecto se invierte de manera que a menos radiación y por tanto menos iluminación se añaden los problemas de una climatología más fría. Esta condición, como veremos más adelante, debe tenerse muy en cuenta en el momento de diseñar los cerramientos.

Y volviendo a la historia del vidrio y su entrada en la Arquitectura, en la Europa de la Alta Edad Media en el Románico los alojamientos humanos pueden calificarse, desde el punto de vista de la iluminación, de lóbregos y cerrados, con iluminación escasa y, en los casos de la Arquitectura civil, casi inexistente y reducida a las puertas de acceso y poco más. La Arquitectura religiosa presentaba un panorama similar, las grandes Catedrales de imponente diseño, por ejemplo Santiago de Compostela, presentan una imagen externa cerrada, de bloque pétreo, y un interior oscuro, diríamos que opresivo y esto ¿por qué?… ¿por una interpretación anímica del culto o por una imposibilidad técnica? La respuesta la encontramos en un movimiento de constructores nacido en L'Ille de France en el S. XII donde unos *iluminados* comenzaron a diseñar estructuras donde se diferenciaba *"lo que soportaba y lo que era soportado"*, los que diseñaron endriagos y monstruos de pesadilla para evacuar el agua de sus cubiertas y separaron claramente cerramiento de estructura, conduciendo los esfuerzos al cimiento mediante bóvedas de tracería, arcos fajones, pilares, baquetones y arbotantes, andamiajes en fin, liberando a los muros de su condición de soporte; era EL GÓTICO, (Fig. 12 y 13) una revolución estructural durante la cual comunidades de canteros y constructores recorrieron Europa dejando atrás su estela de obras; Chartres, Amiens, Reims, Notrê Dame, León, Burgos,… y su canto del cisne, Beauvais abriendo al vidrio las fachadas que, liberadas de su compromiso resistente y convertidas en vidrieras artísticas, pudieron aportar a la Arquitectura *la luz*, y a los interiores *el color*.



Fig. 12. Gárgolas de la Basílica de San Quentin (Francia)

Desde ese momento el vidrio ocupa un espacio propio en el cerramiento, piel, fachada… como queramos llamar al elemento frontera entre interior y exterior en nuestros alojamientos para iluminar y permitir la comunicación visual con el exterior. No obstante, su papel tras el GÓTICO, se subordinaba a cerrar los huecos exteriores asociado inseparablemente a las carpinterías hasta que casi 700 años después, a mediados del S.XIX, otros *iluminados* sucesores del jardinero Le Nôtre, propiciaron una nueva revolución estructural que liberó al vidrio de su papel de relleno.



Fig. 13. Imágenes del Gótico.

Guiados por la necesidad de crear amplios invernaderos para el cultivo de especies tropicales, fueron el origen de otra revolución estructural: el empleo del hierro en forma de fundición y forja para realizar estructuras muy ligeras y cerrarlas totalmente con vidrio.

Esta innovación pulverizó los *corsés* donde el vidrio se alojaba y fue el germen de su empleo con criterios actuales.

Podríamos considerar Palm House y el Palacio de Cristal (Fig.14) posterior, desgraciadamente desaparecido, como padres del uso que el Movimiento Moderno hizo del vidrio y abuelos de nuestras fachadas ligeras.

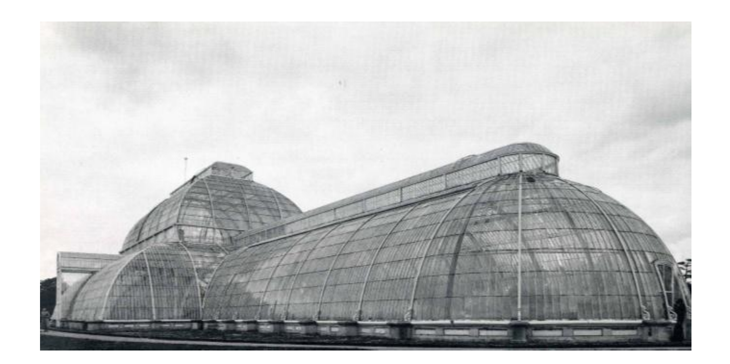


Fig. 14. Imágenes de La Casa de la Palmera (Palm House) de Decimus Burton y Richard Turner.

Con el nacimiento del Movimiento Moderno y la docencia de la Escuela Bauhaus, ya en el S.XX, el vidrio fue elemento primordial en las creaciones de Mies, Le Corbusier, Gropius, van de Velde… y tantos más (Fig.15) que propagaron los criterios de iluminación, relación visual de interior y exterior, ventilación y espacio libre en los que el vidrio tenía papel preponderante, según los Cinco Puntos de la Arquitectura de la U.I.A. (Unión Internacional de Arquitectos)

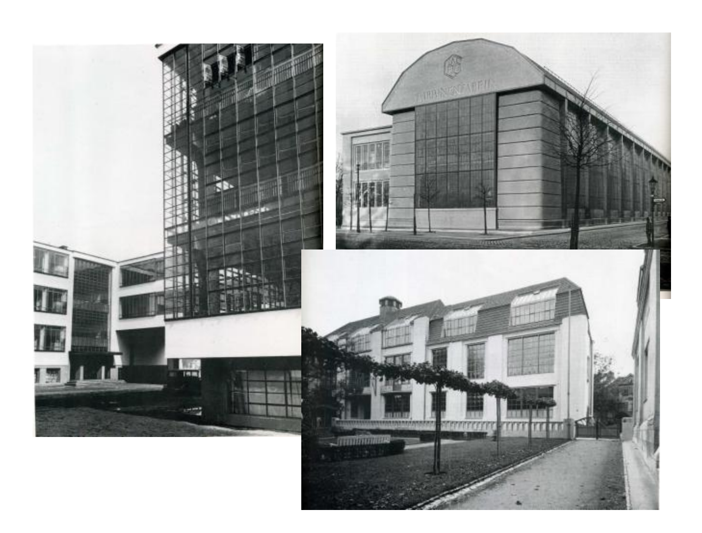


Fig. 15. Imágenes del Bauhaus, en Weimar (van de Velde), Dessau (Walter Gropius), y de la Fábrica de turbinas de AEG (Peter Behrens).

Pero no todo era progresismo y, a pesar de los esfuerzos del Movimiento Moderno, gran parte de la construcción de esa época, incluso los emblemáticos rascacielos de Nueva York; Chrysler, Empire State, Rockefeller Center… (Fig.16) correspondientes al último coletazo en los años treinta del Art Decó americano, se diseñaron con fachadas pétreas y tradicionales carpinterías y vidrio, *canteras colgadas* como las definió Le Corbusier.




Fig. 16. Empire State y Rockefeller Center.

Tras la II Guerra Mundial. la deprimida situación económica de Europa empujó a los profesionales europeos a Estados Unidos donde encontraron posibilidad de desarrollar su trabajo y entre ellos algunos Arquitectos que configuraron el Movimiento Moderno.

Uno de ellos tiene especial significación, primero por haber sido Director de la Escuela Bauhaus y en segundo lugar por haber marcado un hito, un antes y un después, en la Arquitectura de Norteamérica, *Mies van der Rohe*. Como antes hicieron Decimus Burton y Richard Turner con la estructura en la Palm House, Mies cambió radicalmente el concepto de cerramiento exterior de edificios de altura retomando su teórico *rascacielos de acero y vidrio* concebido en los años veinte y que nunca se construyó. La ocasión la encontró en los Apartamentos Lake Shore Drive (Chicago) y fundamentalmente en el Edificio Seagram (Nueva York).




Fig. 17. La Idea (Rascacielos de Acero y Vidrio) y la Realidad (Edificio Seagram).

La diferencia entre este último y los rascacielos del Art Decó (Fig. 16) es el número de ventanas de cada uno; aquellos tienen miles mientras que el Seagram sólo cuatro pues cada fachada es una inmensa ventana de carpintería y vidrio. Había nacido el concepto de *fachada ligera* habitualmente llamado *muro cortina*, denominación no demasiado satisfactoria, anclado a los forjados horizontales de forma flexible.

Considerando que la superficie de carpintería no supera habitualmente el 10 ó 12% de la totalidad del hueco el vidrio se encontró con prácticamente toda la fachada para él, lo que lo convertía en el dueño de la piel de este tipo de construcciones pero también le transfería la responsabilidad de cubrir el resto de prestaciones, térmicas, acústicas, de seguridad, etc. de los cerramientos opacos tradicionales, y todo ello manteniendo su tradicional transparencia.

Por tanto, analizar todas las propiedades físicas del vidrio, tanto térmicas como mecánicas, se hizo imprescindible para obtener resultados óptimos en sus nuevas aplicaciones.

Hitos fundamentales en la investigación que nos conduciría al conocimiento científico del vidrio y sus propiedades fueron:

- Creación de la empresa *Jenaer Glaswerk und Genossen* (Jena, 1884) por los científicos Otto Schott, Ernst Abbe y Carl Zeiss.
- Fundación de *American Ceramic Society* (Estados Unidos, 1899).
- Fundación de *Society of Glass Technology* (Gran Bretaña, 1917).
- Fundación de *Deustche Glastechnische Gesellschaft* (Alemania, 1922).
- Creación de la *International Commission on Glass*, por iniciativa de W. E. S. Turner (principios de los años treinta).

3.1. Propiedades térmicas del Vidrio Incoloro

El Sol proporciona calor y luz y todo cuerpo, situado en la superficie terrestre, está sometido a su acción. La energía solar se transmite por radiaciones, directas o difusas, cuyas longitudes de onda dependen de la temperatura de la *fotosfera*, corteza solar externa, que es de 6000º C. Esa radiación, filtrada por nuestra atmósfera, llega a la superficie terrestre con el siguiente espectro (Fig.18) y en las siguientes proporciones (Tabla 1) para cada longitud de onda:

Tabla 1
Tipo de energía solar recibida según su longitud de onda

Tipo de Radiación	*Longitud de Onda (λ)*	*T% que llega*
Ultravioleta (UV)	310-360 nm	5%
Luz Visible (LV)	360-760 nm	50%
Infrarrojo Solar (IR)	760-2500 nm	45%

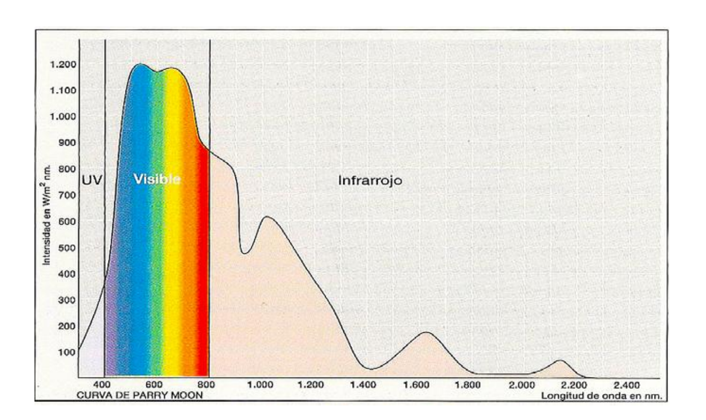


Fig. 18. Curva de Parry Moon.

Todo cuerpo transparente sometido a radiación se comporta, de forma general, de acuerdo al siguiente esquema (Fig.19):

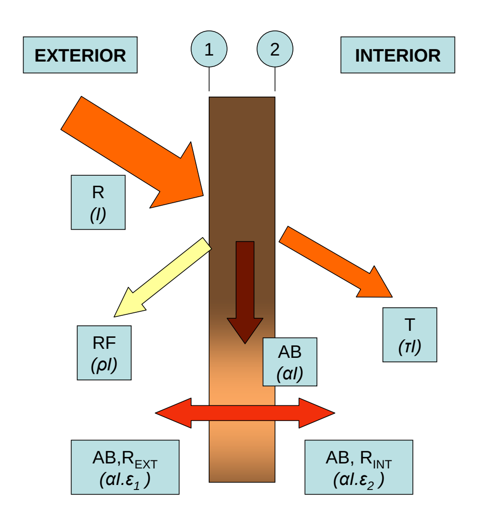


Fig.19. Esquema genérico del mecanismo de Radiación

Donde:

- R *(I)*; Radiación externa Recibida.
- RF *(ρI)*, Radiación Reflejada hacia el Exterior.
- AB *(αI)*, Radiación Absorbida por el cuerpo, que produce una elevación de su temperatura.
- T *(τI)*, Radiación Transmitida al interior.
- RE_{ext}, y RE_{int}, Radiaciones del cuerpo hacia el exterior y el interior, inducidas por su calentamiento, f [AB;*(αI)*] y de la Emisividad de sus caras $f(\varepsilon_i)$.

Este tráfico de radiaciones se produce respetando las siguientes relaciones fundamentales:

$$R = RF + AB + T;\ [(I) = (\rho I) + (\alpha I) + (\tau I)]$$

- $\lambda\ (R) \rightarrow$ f [Temperatura del radiador externo, Sol].
- $\lambda\ (R_{EXT};\ R_{INT}) \rightarrow$ f [Temperatura del cuerpo radiante].

El esquema anterior, particularizado para un vidrio en cada intervalo de longitud de onda, UV (Ultravioleta), LV (Luz Visible) e IR (Infrarrojo Solar) se muestra en la siguiente Fig.20:

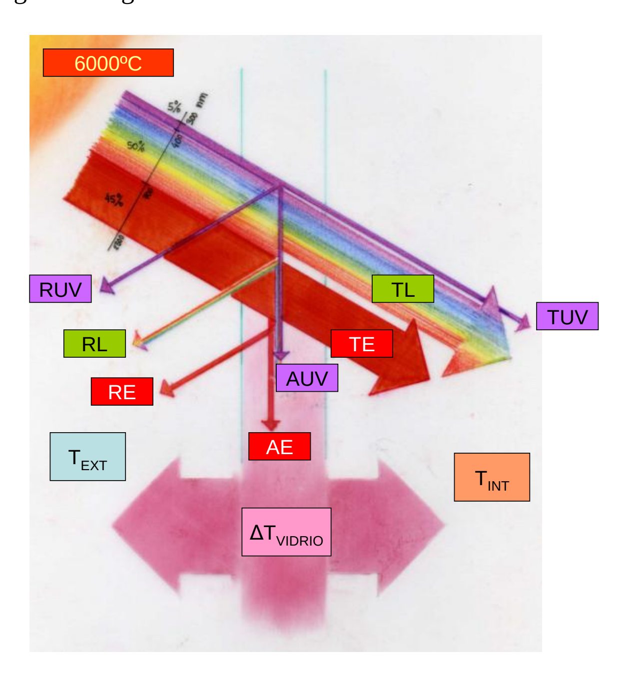


Fig. 20. Esquema del tráfico de la Radiación Solar en un vidrio.

Llamamos Factor Solar (*g*) a la proporción entre la Radiación Total recibida en el Exterior (*R*) y el sumatorio de la Radiación Total directa Transmitida (*T*) más la Absorbida y Reenviada al interior (RE_{INT}), (Fig. 19) y nos indica el nivel de transparencia del vidrio frente a la radiación solar recibida:

$$g = (\Sigma\ [T] + RE_{INT}) / \Sigma\ [R]$$

Por otra parte, respondiendo a los principios de Termodinámica, entre dos zonas a diferente temperatura separadas por una lámina de material homogéneo se producirá un flujo de calor, a través de ésta, de la más caliente a la más fría tendente a igualar temperaturas para estabilizar el sistema.

La permeabilidad de la lámina al calor es una característica del material que la compone y de su espesor y determinará la mayor o menor velocidad del flujo a su través y por tanto su mayor o menor capacidad de aislamiento entre ambos espacios. A este valor se le denomina Transmitancia Térmica (*U*) y su expresión general, para una lámina de material uniforme, es:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{e}{(\lambda)} + \frac{1}{h_i}}$$

Por otra parte, la lámina, en este tráfico de calor, aumentará su temperatura y en función de su capacidad de radiación, lo cederá por sus dos caras de acuerdo a su Emisividad (ε), que es el parámetro superficial de los materiales que mide su facilidad para ceder, por radiación, el calor acumulado.

Para el vidrio, la definición de cada parámetro, sus unidades en el S.I y su dependencia se presentan en la Tabla 2, y el esquema del flujo en la Fig. 21:

Tabla 2
Definición de los parámetros del vidrio

Definición	*Parámetro*	*Función de:*
Coeficiente de Intercambio Superficial Exterior (W. m^{-2}. K^{-1})	h_e*	Velocidad del viento en el Exterior (V_v)
Temperatura Exterior (ºK)	T_{EXT}*	Climatología.
Coeficiente de Conductividad Térmica del Vidrio (W. m^{-1}. K^{-1})	(λ)	Propiedad Física del Vidrio.
Emisividad (s.ud.)	ε	Propiedad Física del Vidrio.
Temperatura Interior (ºK)	T_{INT}	Valor de Acondicionamiento.
Coeficiente de Intercambio Superficial Interior (W. m^{-2}. K^{-1})	h_i	Convección Interior dependiente del sistema de Calefacción
Espesor de la lámina (m)	*e*	Dimensión

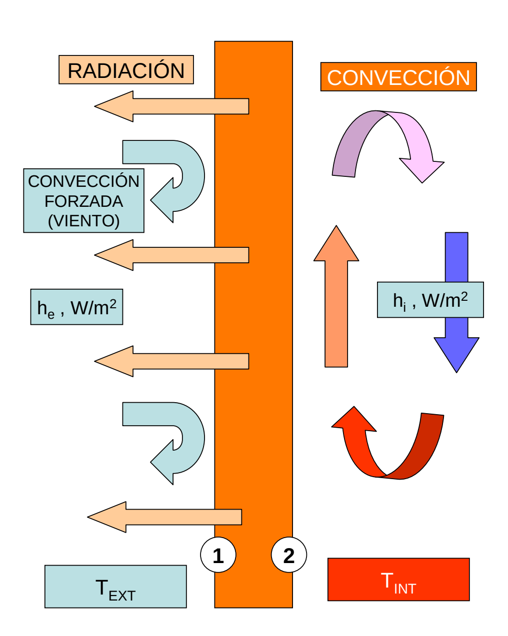


Fig. 21. Flujo del Calor a través de un vidrio sin participación de la Radiación Solar.

De los Parámetros de la Tabla 2, los señalados con (*) son variables y dependen del momento del día, la intensidad de Radiación Solar y la Velocidad del Viento, por lo que en períodos muy cortos, a lo largo de un misma día, pueden oscilar en intervalos muy abiertos.

El resto son fijos pues corresponden a valores físicos del material y a condiciones de la construcción.

El valor medio del Coeficiente de Conductividad Térmica del vidrio es aproximadamente de: $0'85 \leq (\lambda) \leq 1'00$ ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

La Emisividad *(ε)* es el parámetro superficial de los materiales que, como ya hemos dicho, mide su facilidad para ceder por radiación el calor acumulado y su valor, para el vidrio plano incoloro, es igual para ambas caras y de valor, $\varepsilon = 0'89$.

La unidad de la Transmitancia Térmica *(U)* en el S.I. es $W.m^{-2}.K^{-1}$), por tanto para el vidrio monolítico el valor de e/(λ) no es relevante pues su rango oscila de 10^{-2} a 10^{-3}, para los espesores comerciales monolíticos, y las pérdidas de calor a través suyo dependerán solo de los coeficientes de intercambio superficial interior (h_i), exterior (h_e) y de su emisividad (ε).

Para valorar el efecto del viento sobre las pérdidas de calor a través del vidrio se ha estimado la variación del valor del Coeficiente de Intercambio Superficial Exterior (h_e) y de la Transmitancia Térmica (U) para las siguientes condiciones exteriores de partida:

Tabla 3
Condiciones de partida para determinar la variación del Coeficiente de Intercambio Superficial Exterior (h_e) y la Transmitancia Térmica (U)

Definición	*Parámetro*	*Valor*
Temperatura Exterior	T_{EXT}	-2 ºC
Temperatura Interior	T_{INT}	22 ºC
Coeficiente de Intercambio superficial Interior	h_i	8 W/m²K

Se han considerado también ausencia de radiación solar y cielo nublado, condiciones climatológicas que pueden calificarse de moderadamente frías. El valor de las velocidades de viento (V_v) se ha tomado en Grados de la Escala Marítima Beaufort, por ser una referencia habitual y práctica, hasta un valor medio (G.6). El cálculo se ha desarrollado con el Programa *Visión 4.0 incluido en el FRAME plus 5.0* de la *Universidad de WATERLOO (Ontario)* para análisis térmico de acristalamientos.

Tabla 4
Variación de (h_e) y U en función de la velocidad del viento

Viento		*Resultados*	
Grado (G)	*Velocidad* $m.s^{-1}$ *(km.h⁻¹)*	h_e *(W. m⁻². K⁻¹)*	*U (W. m⁻². K⁻¹)*
0	0-0'6 *(0-2)*	12'27	6'85
1	0'8-1'40 *(3-5)*	12'27	6'85
2	1'7-3'1 *(6-11)*	12'27-16	7'40
3	3.3-5´6 *(12-20)*	16'62-22'30	8'15
4	5'8-8'1 *(21-29)*	23'3-28'6	8'60
5	8'3-10'8 *(30-39)*	29'0-34'1	8'92
6	11'1-13'9 *(40-50)*	34'6-39'7	9'19

Con el examen de la Tabla 4 se comprueba que una variación en la velocidad de viento exterior desde G2, (brisa suave) a G6 (viento fresco) incrementa las pérdidas teóricas, a través del vidrio monolítico, un 34%, lo que indica la amplia variabilidad del proceso de cesión de calor por causa externa y no controlables.

Si ahora incorporamos al conjunto la radiación solar, con un valor cualquiera, el comportamiento genérico del mismo sería el presentado en la Fig. 22.

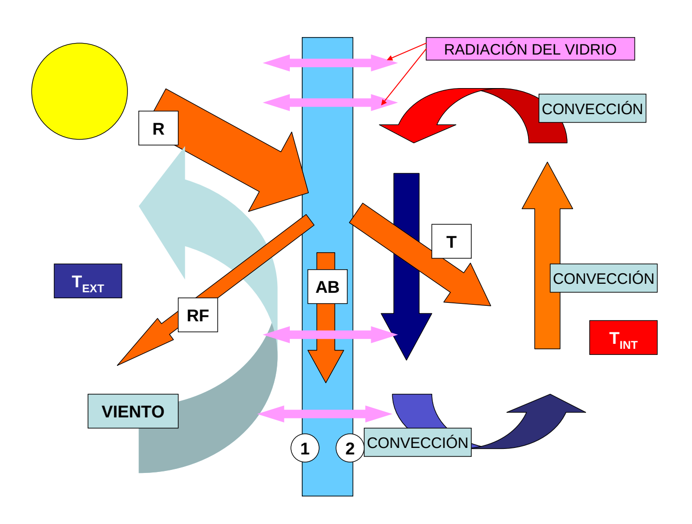


Fig. 22. Flujo Total de Energía a través de un vidrio.

La suma de todas las ganancias y pérdidas a través del vidrio es el Balance Energético (B.Eg.) y nos proporciona la cantidad de energía a aportar (calefacción) o a eliminar (refrigeración) de nuestra estancia para mantener un buen nivel de confort.

Los B.Eg. no son ecuaciones matemáticas con solución exacta y única pues como vemos se rigen por un proceso físico en régimen variable dependiente de valores climatológicos aleatorios y accidentales, Temperaturas Exteriores, Radiación Solar, Nubosidad, y Velocidades de Viento que varían, a lo largo del día, en un entorno muy abierto.

Las variables sobre las que tenemos control son las siguientes:

- Características Físicas de los vidrios que determinan los valores del Factor Solar (g) y la Transmitancia Térmica (U). Sobre esta última, al depender de h_e y por tanto de la velocidad del viento $V_{v,}$ el control es relativo.
- Tipo de calefacción o refrigeración que deseamos instalar que determinará el Coeficiente de Convección Interior (h_i), y por tanto, la velocidad y cantidad de calor que llegará al vidrio.

Las variables aleatorias son, como ya hemos indicado anteriormente:

- Temperatura exterior (TEXT), variable según la estación y durante todo el día. Existen Tablas de valores medios por estación y situación geográfica.
- Radiación Solar directa y difusa (R) cuya variación es estacional según Latitud del lugar, de la que existen Tablas de Radiación Estacionales, y Nubosidad que altera directamente la Radiación Solar reduciendo su efecto directo e incrementando la Radiación difusa, se altera de forma aleatoria a lo largo del día y según las estaciones y de ambos parámetros depende directamente la energía que recibe el vidrio del Sol.
- Velocidad del Viento (Vv), absolutamente variable y dependiente de valores atmosféricos y estacionales, así como de la altura a la que se encuentra instalado el vidrio, la forma de la edificación y las posibles sombras eólicas o efectos de ráfaga inducidos por edificios próximos. Acudiendo a términos estructurales podríamos decir que nos encontramos frente a un problema hipoestático con más datos de los necesarios (grado < 0).

Al valor del B.Eg., que determinará la cantidad de energía a aportar o eliminar del interior para mantener una temperatura de confort, se debe añadir el efecto de calentamiento o enfriamiento del vidrio cuya cara interior (2) está en contacto con nuestro espacio habitable. Determinemos para el vidrio de silicato sodocálcico, incoloro, monolítico, de 6mm que estamos empleando como patrón, la temperatura de cara interna (2) para las condiciones de uso estacionales siguientes:

Tabla 5
Condiciones estacionales de cálculo

Parámetros	*Verano (día)*	*Invierno (Noche)*
Temperatura exterior	36ºC	-2ºC
Radiación	$740W.m^{-1}$	$0W.m^{-1}$
Nubosidad	Despejado	Cubierto
Velocidad de viento	$1m.s^{-1}$	$11m.s^{-1}$

En condiciones de Radiación Solar alta, en día despejado, y sin apenas viento, el vidrio, a pesar de tener una Absorción Energética (15%) bastante baja, alcanza una temperatura de 34ºC convirtiéndose en un radiador hacia el interior e incrementando de forma indeseable la carga térmica de la estancia, lo que exige por tanto, mayor refrigeración para mantener la T_{INT} en torno de los 24ºC.

Para condiciones de temperatura bajas en el exterior, en ausencia absoluta de Radiación Solar y viento medio, el vidrio no pasará de 5ºC y aparecerá una zona de ambiente frío en contacto con su cara interna (*efecto de pared fría)* que produce un área de incomodidad en las proximidades del acristalamiento, además de tener pérdidas elevadas de calor pues su Transmitancia Térmica es muy alta ($U = 9'2W.m^{-2}.K^{-1}$).

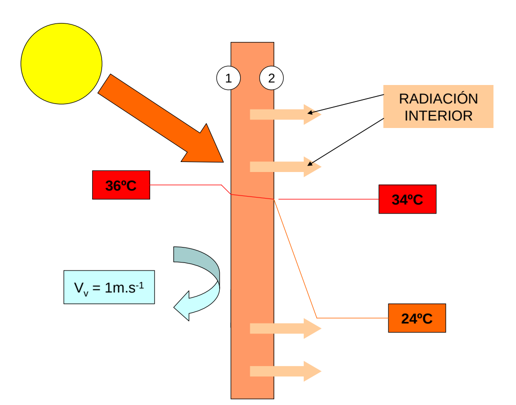


Fig. 23. Temperaturas de cara interna (VERANO).

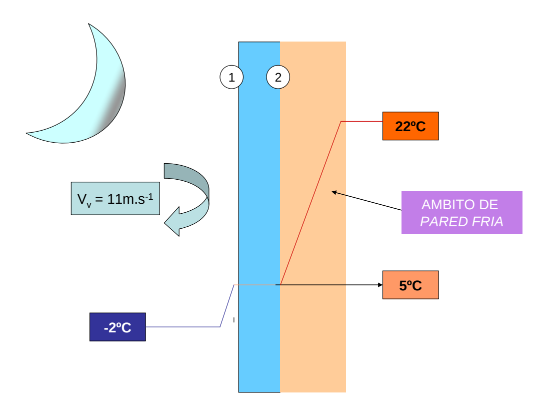


Fig. 24. Temperaturas de cara interna (INVIERNO).

De los resultados obtenidos se deduce que cuanto más cercana sea la temperatura interior del vidrio, cara (2), a la T_{INT} de confort en la estancia, mejor comportamiento térmico tendrá el acristalamiento y menores serán los consumos de acondicionamiento; pero el vidrio incoloro por sí mismo no alcanza los parámetros físicos necesarios y fue necesaria su evolución.

3.2. Evolución del vidrio. Vidrios de prestaciones mejoradas

Recapitulando lo visto en el Apartado anterior, los acristalamientos del Movimiento Moderno, el Art Decó de los años treinta e incluso los primeros rascacielos de fachada ligera en la década de los cincuenta contaban, sólo, con vidrio plano incoloro obtenido por procedimientos de estirado o por laminado continuo y pulido.

Para los parámetros fundamentales de comportamiento de cualquier vidrio frente a la Radiación Solar y la Transmisión de Calor se empleará la siguiente nomenclatura en cada tramo de longitud de onda λ:

Los valores teóricos de estos parámetros se determinan en Laboratorio de acuerdo a las prescripciones de la Norma EN 410:2011. *Vidrio para la edificación.*

• *Determinación de las características luminosas y solares de los acristalamientos*

Tabla 6
Parámetros espectrofotométricos y térmicos de los vidrios

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV}	TL	TE
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT}	RE_{EXT}
Reflexión Interior	---	RL_{INT}(1)	RE_{INT}(1)
Absorción	---	---	AE
Factor Solar	g		
Transmitancia Térmica	U		

(*) NOTAS:
(UV); Radiación Ultravioleta, $(310 \leq \lambda \leq 360)$ nm
(LV); Luz Visible, $(360 < \lambda \leq 760)$ nm
(IR); Infrarrojo Solar, $(760 < \lambda \leq 2500)$ nm
la RE_{INT} y RL_{INT} no participan en la ecuación general de compatibilidad de la Radiación Solar RD = T + RF +AB.

Los parámetros para un vidrio de silicato sodocálcico incoloro de 6mm (el espesor no es demasiado relevante para ellos), son los siguientes:

Tabla 7
Valores espectrofotométricos y térmicos de un vidrio incoloro de 6mm

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 53%	TL : 89%	TE : 79%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 8%	RE_{EXT} : 7%
Reflexión Interior	---	RL_{INT}(1): 8%	RE_{INT}(1): 7%
Absorción	---	---	AE : 14%
Factor Solar			g : 0’82
Transmitancia Térmica	U: 5’7 $W.m^{-2}.K^{-1}$ (1)		

(*) NOTA: Se debe recordar aquí, y no olvidarlo en siguientes ocasiones, que el valor de U depende directamente del intercambio térmico superficial exterior, que es función a su vez de la velocidad de viento ($h_e \rightarrow f[V_v]$); el valor de (U) de la Tabla es por consiguiente, relativo y comparable con el de otros vidrios ensayados de acuerdo a la Norma EN-410:2011 pero no absoluto y por tanto, solo es fiable para vidrios ensayados en las mismas condiciones.

Las prestaciones de este vidrio son muy buenas en el rango de la luz visible (TL: 89%) pero realmente escasas en cuanto a protección térmica tanto para la Radiación Solar (TE: 79% y g: 0’82) como para la Transmitancia Térmica teórica (U: 5’70$W.m^{-2}.K^{-1}$).

Esta circunstancia perjudicaba el uso del vidrio incoloro para fines que no fueran los de iluminación y forzaba al empleo de elementos complementarios para reducir la radiación directa solar, interponiendo una hoja de cualquier material que no fuera transparente, entre la Radiación Solar directa y el acristalamiento.

Los toldos o la tradicional persiana han sido de uso habitual en climas subtropicales, también los vuelos horizontales o marquesinas, que no reducen la visión pero arrojan sombras sobre el acristalamiento, cumplen la misma función y la inclinación de los vidrios hacia el exterior disminuye el ángulo de incidencia de los rayos solares reduciendo su intensidad de radiación.

Pero estas medidas eran válidas, y aún lo son bien utilizadas, para huecos de dimensiones habituales hasta la llegada de las ventanas-fachada (Edificio Seagram) en las que su aplicación resultaba imposible. Podemos imaginar el Rockefeller Center o el Empire State con toldos (Fig.25) en sus ventanas pero sería cómico asociar su uso al Seagram.

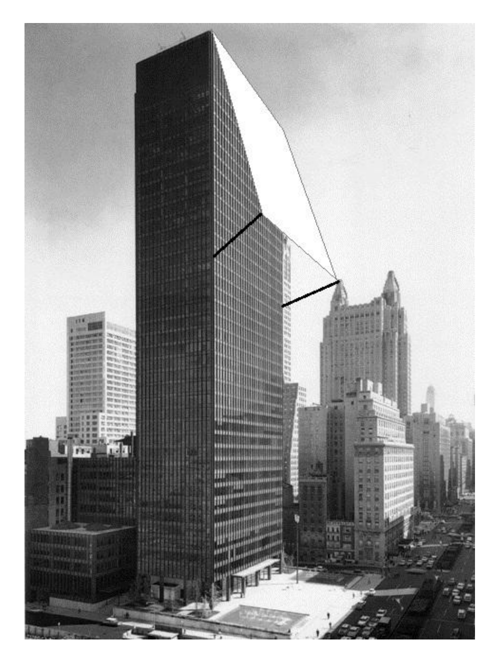


Fig. 25. Edificio Seagram con protección solar.

Se desarrollaron así vidrios que fueran más eficientes para Control Solar y Aislamiento Térmico sin alterar sustancialmente sus propiedades luminosas obteniendo las siguientes familias.

Tabla 8
Definición de los tipos genéricos de vidrios para fachadas

Propiedades	*Tipo de vidrio*
Control Solar	Absorbente (V.C.M.)
	Reflectante Pirolítico (V.C.)
	Reflectante Magnetrónico (V.C.)
Aislamiento Térmico	Bajos Emisivos Pirolíticos (V.C.)
	Bajos Emisivos Magnetrónicos (V.C.)
Control Solar + Aislamiento Térmico	Reflectantes Magnetrónicos con Baja Emisividad (V.C.)

(*) NOTA: (VCM) corresponde a vidrios de color en masa, absorbentes. (VC) son vidrios con capas aplicadas en una de sus caras, reflectantes.

3.2.1. Vidrios absorbentes

Considerando la relación fundamental del tráfico de la Radiación de Energía Solar a través de un vidrio:

$$R = RF + A + T$$

Y por tanto:

$$T = R - (A + RF)$$

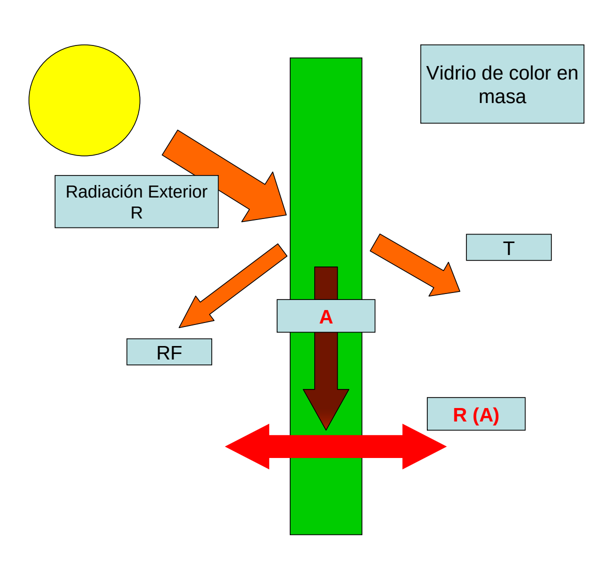


Fig. 26. Esquema de flujos de radiación.

Incrementar la absorción (A) conduce a disminuir la transmisión (T) si se conserva la reflexión (RF), lo que se consiguió desarrollando vidrios de color en masa, verde, gris y bronce, partiendo de composiciones de vidrio tradicional e incorporando [1]:

- Iones ferrosos (Fe^{2+}) para el color Verde.
- Óxido de Cobalto y óxido ferroso para el Gris.
- Selenio e iones ferrosos (Fe^{2+}) para el Bronce.

Tabla 9

Valores espectrofotométricos y térmicos de un vidrio de color en masa, verde, de 6mm

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 18%	TL : 73%	TE : 43%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 7%	RE_{EXT} : 5%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 7%	RE_{INT} : 5%
Absorción	---	---	*AE : 51%*
Factor Solar			g : 0’57
Transmitancia Térmica	U: 5’7 $W.m^{-2}.K^{-1}$		

El incremento de la absorción (AE) tiene un resultado secundario que es el aumento de temperatura del vidrio sometido a radiación y por tanto el aumento de la parte de absorción reenviada al interior por radiación del vidrio caliente, R(A). Este efecto debe valorarse con cuidado pues la reducción de carga térmica obtenida en el instante de la radiación se pierde por la emisión de calor, durante las horas siguientes a la radiación, del vidrio caliente hacia el interior.

El efecto será particularmente molesto en climas templados con gradientes de temperatura reducidos entre el día y la noche, y beneficioso en climas de meseta, con gradiente importante, en los que el vidrio puede ejercer el efecto de radiador gratuito hacia el interior en la noche.

Los valores característicos de cada vidrio se pueden encontrar en las Tablas facilitadas por los fabricantes para cada espesor y color aunque aquí presentamos los correspondientes al vidrio verde de 6 y 10mm para comparar sus valores con el incoloro ya conocido.

Tabla 10

Valores espectrofotométricos y térmicos de un vidrio de color en masa verde, de 10mm

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 9%	TL : 63%	TE : 31%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 6%	RE_{EXT} : 5%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 6%	RE_{INT} : 5%
Absorción	---	---	*AE : 64%*
Factor Solar			g : 0’48
Transmitancia Térmica	U: 5’6 $W.m^{-2}.K^{-1}$		

Estos vidrios mantienen una transmisión luminosa cuantitativamente alta pero por efecto de su coloración la luz transmitida sufre alteraciones significativas en su espectro y deformará los colores en el interior, punto a tener en cuenta. Analizando ambos vidrios para las condiciones empleadas para el vidrio incoloro y definidas en la Tabla 5 las temperaturas de cara interna, (2), dan los siguientes valores:

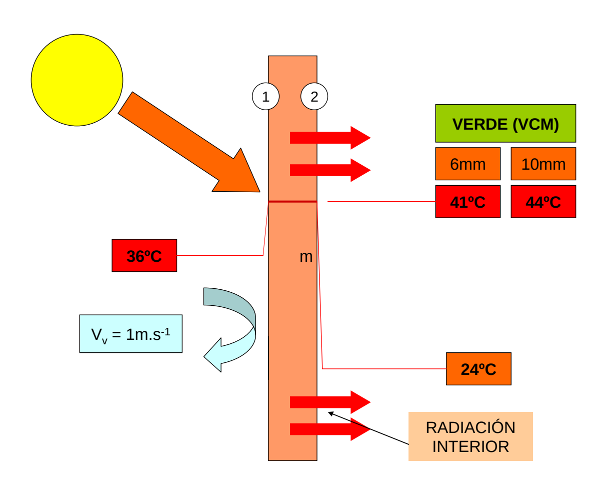


Fig. 27. Temperaturas en régimen cálido.
Vidrio verde (VCM) de 6 y 10mm.

Temperaturas de 41ºC y 44ºC se aproximan a las de un radiador tradicional de calefacción por agua caliente, y superan a los 36ºC del exterior.

En régimen de frío, con radiación nula, se obtienen prácticamente los mismos resultados que para el vidrio incoloro.

El uso de vidrios de color en masa debe ir acompañado, por tanto, de un estudio cuidadoso de los efectos de rebote de calor o emplearlos en posición externa con cámara ventilada para aprovechar su factor solar (g) y evitar el calentamiento exterior. Ejemplos son las fachadas de doble piel o las de pantalla.

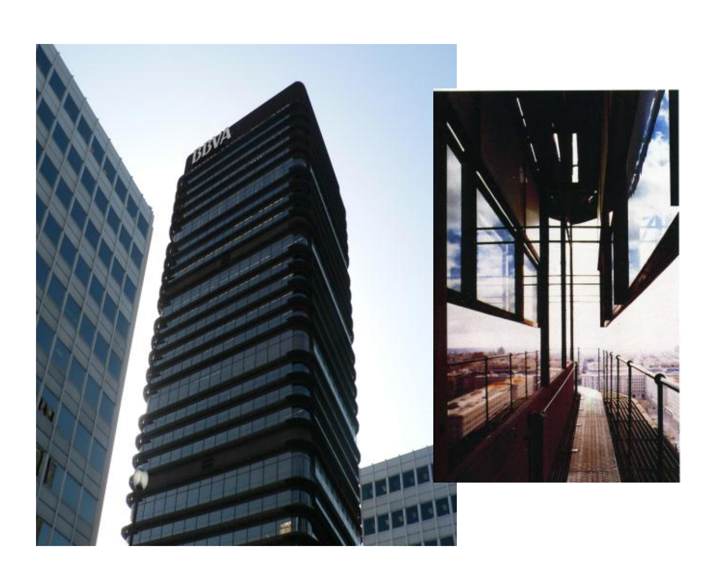


Fig. 28. Edificio del BBVA (AZCA). Fco. Javier Saénz de Oiza.

3.2.2. Vidrios de capas

Tras los vidrios de color en masa (VCM), que modificaban la absorción energética, la investigación se centró en la reflexión. Conocida es desde muy antiguo la capacidad de reflejo de los espejos pero el espejo, con azogado ordinario, refleja tanto la luz como la radiación infrarroja solar; basta recordar que Arquímedes de Siracusa diseñó espejos curvos con los que incendiaba las velas de los navíos romanos que sitiaban su ciudad y en la actualidad, aunque bien es verdad que con poco éxito, se intentan comercializar *cocinas solares campestres* que consisten simplemente en un espejo parabólico en cuyo foco se sitúa el recipiente para cocinar.

Ahora bien, el espejo ordinario es opaco, lo que contradice la primera y fundamental propiedad que debe satisfacer un vidrio de fachada, la iluminación, y por tanto inútil para nuestros fines pero ¿es opaco por el tratamiento que recibe o por el espesor de ese tratamiento?

Planteado de otra manera, un metal, similar a los empleados en la fabricación del espejo tradicional ¿podría llegar a ser transparente? El espesor de tratamiento de un espejo se mide en micras (µm) y con ese espesor no permite el paso de la luz pero ¿si la capa pudiera reducir su espesor a dimensiones nanométricas (nm) mil veces menor que la anterior, es decir en el campo de las radiaciones que el vidrio recibe, seguiría siendo opaca?

En geología es habitual preparar muestras de minerales para su estudio con microscopía óptica por transmisión, por lo que deben tener transparencia. En términos coloquiales, de un adoquín, absolutamente opaco, se puede preparar una muestra transparente de granito. Los romanos ya colocaban en sus huecos exteriores placas muy finas de alabastro que era, por lo menos, translúcido y Mies van der Rohe (siempre Mies…) empleó alabastro en algunas de sus obras para transmitir iluminación tamizada al interior.

Estos razonamientos llevaron a la técnica de deposición de capas superficiales de muy bajo espesor en los vidrios y al nacimiento así de los *espejos energéticos* como bien podríamos llamar a los vidrios de capas.

Sus procesos de fabricación siguieron dos vías:

- Fabricación en caliente (Pirolítica), la más antigua, depositando agentes reactivos sobre el vidrio a su salida del baño (600ºC) inmediatamente antes de entrar en el arca de recocido.
- En frío por un proceso magnetrónico mediante el cual se *bombardea* el vidrio, en una cámara de alto vacío, con partículas metálicas desprendidas de un cátodo metálico que según el gas empleado en la fabricación (gas noble inerte, oxígeno o nitrógeno) llegan al vidrio en forma de metales puros, óxidos o nitruros respectivamente. Esta técnica se debe a la investigación en el campo de la informática para fabricar circuitos para ordenadores sobre láminas de vidrio, con conductores metálicos.

Prácticamente todos los vidrios del mercado destinados al acondicionamiento térmico se fabrican con pocas variaciones, por estos procedimientos, ya sea para protección solar o para aislamiento (Baja Emisividad).

Las capas se clasifican, según su resistencia a la degradación, de acuerdo a la Norma EN-1096: Parte 1, en las siguientes Clases:

Tabla 12
Clases de los vidrios de capa en función de su resistencia s la intemperie

Clase	*Uso en acristalamiento*	*Colocación de la capa*
A	Monolítico U.V.A. o Laminado	Exterior o Interior, indistintamente
B		Sólo en el interior
C	U.V.A. o Laminado	Conveniente en contacto con el intercalario
D	U.V.A., solamente	En el interior de la cámara, desbandando los bordes de la capa para realizar el sellado de estanquidad sobre vidrio base

Además de estas Clases, existe una última clase, S, para uso específico en escaparates de almacenes y utilizable con la capa al interior o el exterior pero cuya esperanza de vida es baja y por consiguiente no es recomendable su uso en edificación habitual.

• *Capas de fabricación pirolítica*

El principio de fabricación consiste en proyectar el agente reactivo sobre el vidrio, que puede ser incoloro o coloreado en masa, a 600ºC, con lo que se produce una reacción del agente portador con la temperatura del vidrio quedando sobre el mismo la capa del elemento a depositar firmemente adherida por ser un proceso térmico.

Los agentes reactivos que se depositan sobre el vidrio pueden ser [3]:

1. Gas Silano (SiH_4) para depositar sílice, o disoluciones líquidas de metales (Cr, Ni, Co, Fe) para fabricar vidrios de Protección Solar con (g) mejorada.
2. Disoluciones sólidas de SnO_2, en partículas de 5nm (50A^o) para producir los vidrios de Baja Emisividad.

Las capas así obtenidas son de Clase A o B para las capas metálicas y B para las no metálicas (sílice) y sus principales limitaciones son el espesor de fabricación, pues sólo se elaboran en 6mm, y la lentitud del proceso de obtención.

Por otra parte tiene buena transmisión luminosa (TL) y baja absorción energética (AE) para un factor solar (g) algo mayor que el verde de 6mm, pero su reflexión luminosa exterior (RL_{EXT}) es alta, casi triple que la de un incoloro, por lo que condiciona el diseño y puede producir deslumbramientos indeseables en su entorno según la orientación.

Está considerado de algún modo como un vidrio *demodé* pero aún sigue en producción, en ocasiones como primario de otro acristalamiento de uso más específico como es el caso del tipo de Baja Emisividad empleado como vidrio base para su transformación en puertas de hornos domésticos. Las características técnicas medias de estos vidrios son básicamente siguientes:

Tabla 13
Valores espectrofotométricos y térmicos de un vidrio de capa Pirolítica PLATA

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 32%	TL : 66%	TE : 63%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 29%	RE_{EXT} : 25%
Reflexión Interior	---	RL_{INT}: 31%	RE_{INT} : 21%
Absorción	---	---	AE : 16%
Factor Solar			g : 0’66
Transmitancia Térmica	U: 5’7 W.m^{-2}. K^{-1}		

Tabla 14
Valores espectrofotométricos y térmicos de un vidrio de capa Pirolítica INCOLORA

Pirolítico CLARO-INCOLORO

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 19%	TL : 45%	TE : 50%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 32%	RE_{EXT} : 25%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 26%	RE_{INT} : 19%
Absorción	---	---	AE : 25%
Factor Solar			g : 0’56
Transmitancia Térmica	U: 5’6 W.m^{-2}. K^{-1}		

• *Capas de fabricación magnetrónica.*

Su principio es análogo, depositar sobre la superficie de un vidrio, en atmósfera de vacío, una capa que en este caso es siempre metálica, que confiere al vidrio determinadas propiedades de filtro de radiaciones y aislamiento.

La fabricación se realiza sobre vidrios *fríos* y de reciente fabricación, *frescos* según el argot del vidriero, para que su superficie se encuentre en el mejor estado posible y libre de adherencias y suciedad. Algunos vidrieros instalan estas líneas de fabricación a continuación de los hornos de producción de vidrio base evitando de este modo al máximo el transporte y manipulación del vidrio antes de la deposición de las capas.

El abanico de metales empleados en las capas es muy amplio, Au, Ag, Cr, Ni, Ti, Zn, Cu,… y sus óxidos o nitruros lo que diversifica mucho los tipos de vidrios obtenidos. En resumen se busca dotar al vidrio base de *filtros* de radiación para diferentes longitudes de onda y obtener así diferentes niveles de protección. El vidrio resultante es de Clase B o C.

Las capas genéricas de un vidrio magnetrónico de protección solar y su comportamiento térmico, independientemente de los metales específicos empleados en su fabricación, son los siguientes:

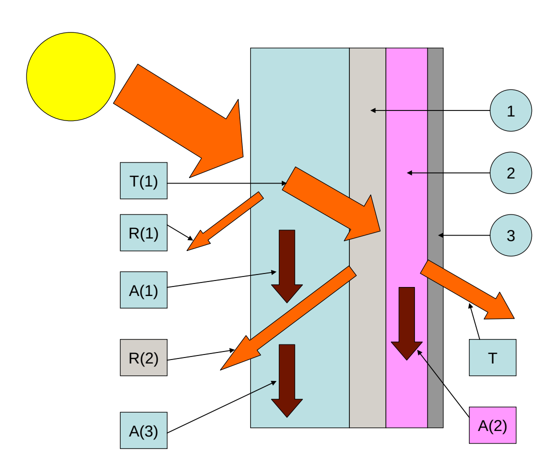


Fig. 29. Esquema de un vidrio de capa.

La función general de cada capa es:

1. Reflexión.
2. Absorción.
3. Protección de las anteriores.

El tráfico de la radiación a través del vidrio se presenta en el esquema:

- T(1), R(1) y A(1) son, respectivamente Transmisión, Reflexión y Absorción primarias del vidrio base.
- R(2), Reflexión debida a la capa reflectante.
- A(2), Absorción debida a la capa absorbente.
- A(3), Absorción del vidrio base debida a la reflexión de capa reflectante; R(2).
- T, Transmisión final.
- ∑ [A(1) + A(2) + A(3)], Absorción total.

En la Fig. 29 se comprueba que este tipo de vidrio de capa dispone de varios filtros para la radiación pero esta, al atravesar dos veces al vidrio base, incrementa su temperatura por lo que el empleo de vidrios de color en masa puede llevar al vidrio en casos extremos, por ejemplo con vidrio de color en masa y capa de alta protección, a valores de absorción total de AE:80%, llevando aparejada una transmisión luminosa baja o muy baja (TL: 7%) y los riesgos descritos en el *Apartado 4: Comportamiento mecánico del vidrio.*

La disposición y función de cada capa indica que el vidrio de capa magnetrónica tiene *posición determinada, siempre con la cara tratada hacia el interior, en la cara (2) del acristalamiento, generalizando en "cara par" si la U.V.A.(Unidad de Vidrio Aislante) tiene más de una cámara aunque no es frecuente*. Si su colocación se invierte la primera capa que la radiación encuentra es la absorbente lo que desbarata todo el esquema y reduce su protección solar en casi un 60%, incrementando además su calentamiento.

Cuando se trata de obtener vidrios aislantes, los llamados de Baja Emisidad ó *Low E*, el número de capas de fabricación es mucho mayor, en ocasiones más de siete, una de las cuales es de Ag, por lo que el vidrio obtenido es muy sensible a la oxidación y pertenece a la Clase D, debiendo siempre ensamblarse en una unidad de vidrio aislante U.V.A. y desbordearlos para garantizar su adherencia co el adhesivo de las U.V.A. y su durabilidad. Su transmisión luminosa es muy elevada y el aspecto externo es casi el de un vidrio sin tratamiento.

Los vidrios de B.E. deben colocarse en cualquier cara interior de una U.V.A., caras (2) ó (3) pero siempre con la capa en contacto con el aire o gas de la cámara pues si se laminara contra otro vidrio con la capa en contacto con el intercalario (PVB) transmitiría calor por Conducción perdiendo su capacidad de aislamiento. Las Emisividades oscilan entre valores de $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,02$.

La versatilidad en la producción de vidrios de capa permitió aunar en una sola capa las propiedades de Control Solar y Baja Emisividad generando la familia de vidrios *selectivos*, según nomenclatura de los fabricantes, que garantizan una buena protección solar y un alto aislamiento térmico. Pertenecen también a la Clase D o, como mucho, a la C ensamblándose habitualmente en unidades U.V.A. La capa, por su carácter de Protección Solar, debe ser colocarse siempre en cámara y orientada hacia el interior, cara (2).

Los vidrios de capa magnetrónica se denominan de forma habitual por su Factor de Eficacia, relación (TL/g); así, un 60/40 sería un vidrio con TL: 60% y Factor Solar 0'40. Adjuntamos Tablas con los valores de algunos de base incolora y de color, de 6mm, y con diferentes niveles de protección solar, sin B.E.

Tabla 15
Magnetrónico INCOLORO (Protección Solar Alta/ 20)

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 15%	TL : 20%	TE : 17%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 32%	RE_{EXT} : 26%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 27%	RE_{INT} : 32%
Absorción	---	---	AE : 57%
Factor Solar			g : 0'30
Transmitancia Térmica	U: 5'2 $W.m^{-2}. K^{-1}$		

Tabla 16
Magnetrónico INCOLORO (Protección Solar Baja/50)

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 29%	TL : 51%	TE : 45%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 18%	RE_{EXT} : 14%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 17%	RE_{INT} : 17%
Absorción	---	---	AE : 40%
Factor Solar			g : 0'56
Transmitancia Térmica	U: 5'7 $W.m^{-2}. K^{-1}$		

Tabla 17
Magnetrónico VERDE (Protección Solar Alta/ 20)

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 5%	TL : 16%	TE : 1%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 23%	RE_{EXT} : 13%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 27%	RE_{INT} : 32%
Absorción	---	---	AE : 77%
Factor Solar			g : 0'28
Transmitancia Térmica	U: 5'2 $W.m^{-2}. K^{-1}$		

Tabla 18
Magnetrónico VERDE (Protección Solar Baja/50)

Parámetros	*UV*	*LV*	*IR*
Transmisión	T_{UV} : 10%	TL : 42%	TE : 25%
Reflexión Exterior	---	RL_{EXT} : 14%	RE_{EXT} : 9%
Reflexión Interior	---	RL_{INT} : 16%	RE_{INT} : 17%
Absorción	---	---	AE : 66%
Factor Solar			g : 0'42
Transmitancia Térmica	U: 5'7 $W.m^{-2}. K^{-1}$		

3.3. Evolución del vidrio. Acristalamientos compuestos

Hasta ahora hemos hablado de protección solar pero nuestro clima también tiene estaciones frías, o gradientes térmicos significativos diarios en estaciones denominadas cálidas, y es necesario considerar también las pérdidas térmicas a través del acristalamiento.

Recordando (Fig. 22) cómo se pierde calor a través de un vidrio entre exterior e interior, el mecanismo dependía fundamentalmente de:

- Coeficiente Convectivo Interior (h_i), dependiente del tipo de acondicionamiento de la estancia, y que nos indica la velocidad con la que el aire, *caloportador*, lleva el calor al vidrio.
- Coeficiente de Intercambio Superficial Exterior (h_e), dependiente de la velocidad del viento en el exterior (V_v).
- Radiación del vidrio hacia el exterior, dependiente de su Emisividad (ε).

En resumen, las pérdidas térmicas en régimen frío se producen por Convección y Radiación. Si disponemos dos láminas de vidrio a una distancia significativa, por ejemplo 1 ó 2m, y sin Radiación Solar, el tráfico de calor seguirá la siguiente ruta:

En el interior, la convección calentará el vidrio interno [(4)-(3)] que a su vez radiará sobre la cámara intermedia en la que el aire comenzará un movimiento de convección que también calentará al vidrio más exterior [(2)-(1)] que perderá el calor por refrigeración del viento y por radiación, y a esto se sumará la pérdida térmica del vidrio, función de su Transmitancia (U). En la pérdida térmica participan, fundamentalmente, las dos formas de transmisión de calor, Convección y Radiación.

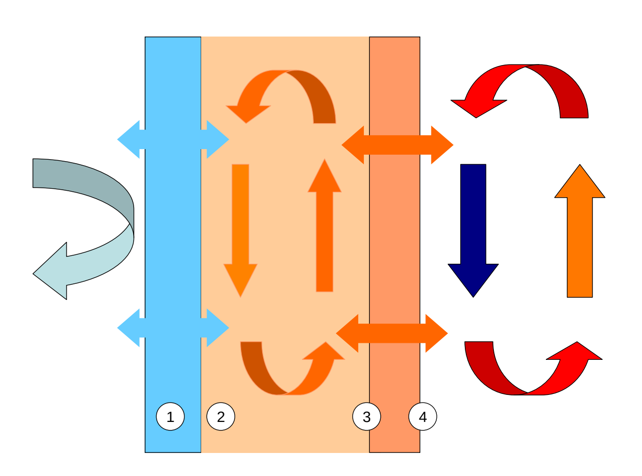


Fig. 30. Transferencia térmica de calor sin Radiación Solar.

Considerando una lámina vertical a una Temperatura (T) en contacto con un fluido caloportador, la velocidad del fluido seguirá el esquema de las Figs. 31 y 32 movilizándose la convección natural por desplazamiento del fluido más caliente hacia arriba al hacerse menos denso.

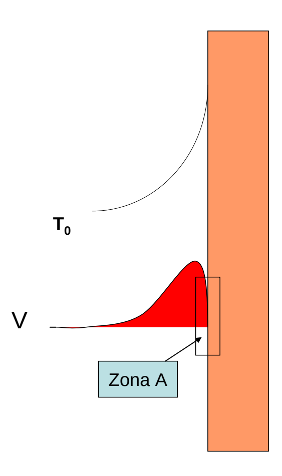


Fig. 31. Incidencia de la Temperatura en la velocidad de circulación del fluido caloportador.

En la Zona A el aire de la cámara, fluido caloportador, tiene una viscosidad en función de su temperatura, y dependiendo de ese valor en las zonas inmediatas a la lámina vítrea predominan las fuerzas viscosas entre aire y vidrio favoreciendo un régimen laminar (deslizamiento paralelo de las láminas de aire respecto al vidrio) que impide el movimiento de convección. De forma coloquial es como si el aire estuviera *pegado* al vidrio.

Según nos alejamos de la lámina disminuye la acción de las fuerzas viscosas a favor de las cinemáticas que producen movimientos turbulentos hasta que a una distancia (*e*) son éstas las dominantes y el régimen del aire es claramente irregular apareciendo la convección. Por tanto, si acercamos ambos vidrios hasta llegar a la distancia límite entre los regímenes laminar y turbulento la convección prácticamente desaparecerá y habremos eliminado una de las pérdidas de calor.

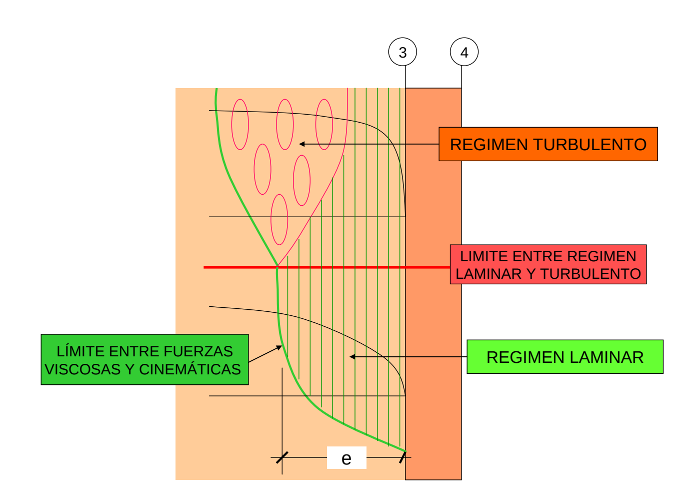


Fig. 32. Detalle de la Zona A. Movimiento del aire en convección natural.

Para cámaras de aire de U.V.A. (Unidad de Vidrio Aislante) esa dimensión se ha estimado en 18mm o 20mm, a lo sumo y es la máxima recomendable para obtener su rendimiento óptimo.

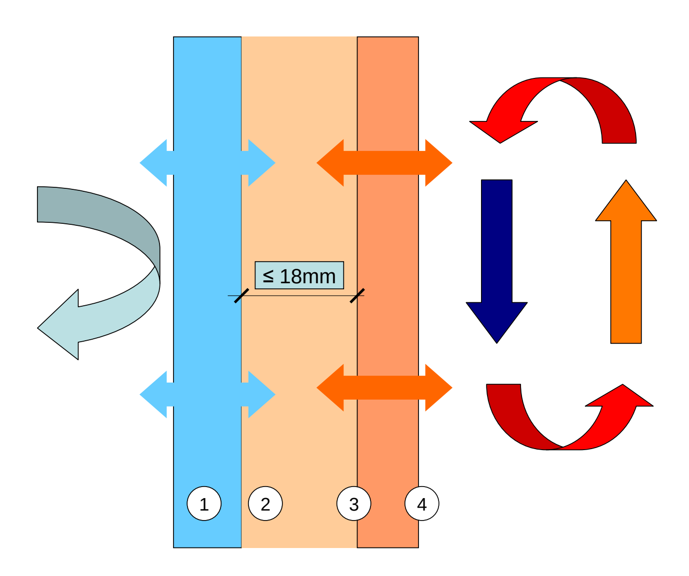


Fig. 33. Esquema de pérdidas en una U.V.A. con cámara adecuada.

El empleo de otros gases estables en las cámaras, generalmente argón, con viscosidades diferentes a las del aire puede mejorar el rendimiento de la U.V.A. y permite emplear cámaras de mayor dimensión con una ganancia en los resultados finales.

El empleo de vidrios de B.E. incrementa el rendimiento térmico en temporada fría y en la Fig. 34 vemos la evolución cualitativa del empleo de U.V.A. respecto a monolítico y del empleo de gases y vidrios de Baja Emisividad que se detalla en la Tabla 19, para condiciones de cálculo normativos y sin radiación solar.

Tabla 19

Comparación de los valores de U entre U.V.A. por espesor de cámara, gas de la misma y empleo de vidrios de Baja Emisividad

A. 6 Incoloro (S) 6 Incoloro

	Cámara de Aire		*Cámara de Argón (Ar)*	
S	*U*	*Ganancia*[(1)]	*U*	*Ganancia*[(1)]
6mm	3’25	*43’5%*	2’99	*48%*
18mm	2’72	*52’7%*	2’59	*55%*

B. 6 Incoloro (S) 6 Bajo Emisivo [ε = 0’04]

	Cámara de Aire		*Cámara de Argón (Ar)*	
S	*U*	*Ganancia*[(2)]	*U*	*Ganancia*[(2)]
6mm	2’08	*36%*	2’09	*30%*
18mm	1’55	*43%*	1’30	*49’8%*

NOTAS: [(1)] Ganancia de aislamiento respecto al monolítico de 6mm
[(2)] Ganancia respecto a la misma composición sin B.E

Como valor de comparación se emplea la Transmitancia del vidrio de 6mm.

$$U_{6mm}=5'73W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$$

Como simplificación podemos resumir que el salto fundamental en la reducción de los valores de la Transmitancia se produjo con el ensamblado de acristalamientos con cámara de aire de baja convección (U.V.A.) que posteriormente recibió el refuerzo de los vidrios de Baja Emisividad.

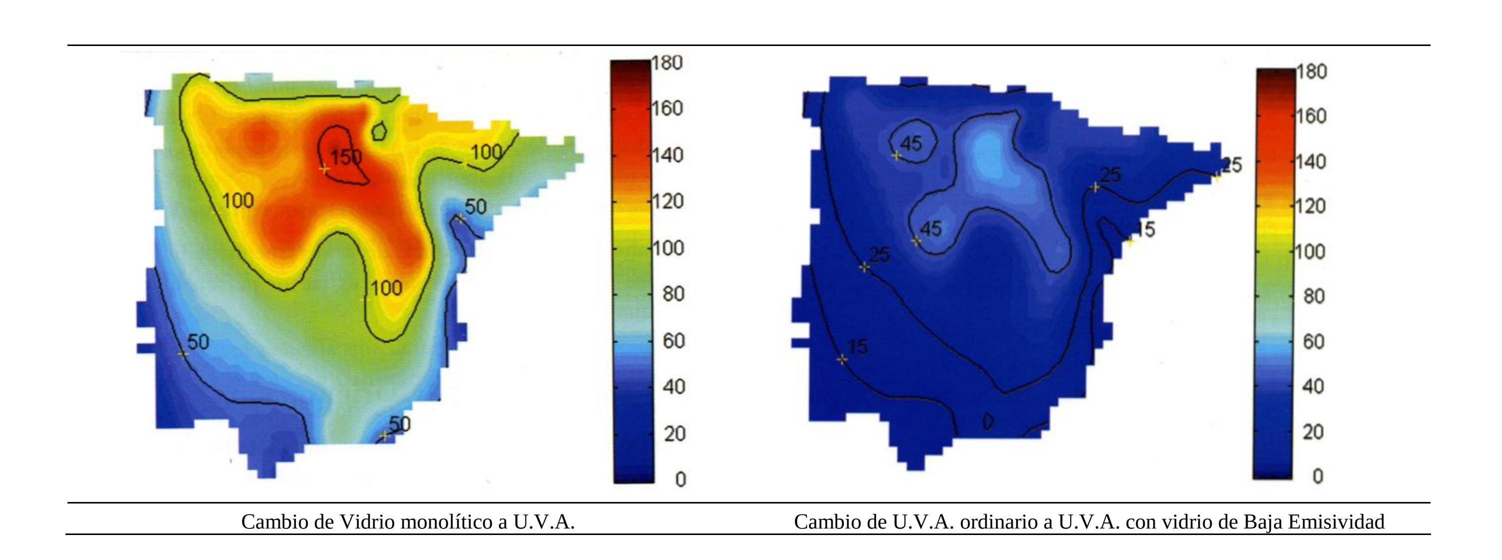
La cámara de una U.V.A. se debe denominar, por tanto, cámara de baja convección, definición que indica claramente su comportamiento térmico aunque en muchas ocasiones se defina como de aire desecado, lo cual es cierto pero no basta, e incluso como cámara de vacío por el razonamiento de si no existe fluido no existe convección, impecable térmicamente pero un disparate mecánico pues los vidrios de una U.V.A. con vacío en su cámara estarían soportando al nivel del mar una presión de 100kN/m2 equivalente a 100m de columna de agua.

La efectividad de cada tipo de acristalamiento, aplicado a situaciones climatológicas reales, se puede comprobar en la Fig. 34, genérica de la evolución de los vidrios aislante, y en la Fig.35 tomada del Libro 1 de los *Fundamentos Técnicos de la Calificación Energética de Viviendas.* Publicación de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento y del IDAE del Ministerio de Industria y Energía (1999).

RENDIMIENTO DE LAS CÁMARAS DE U.V.A.
Y DE LOS VIDRIOS DE B.E.

Cámara (mm)
20
18
15
12
10
8
6
5
0'00
0'00 0'50 1'00 1'50 2'00 2'50 3'00 3'50 4'00 4'50 5'00 5'50
U del Incoloro de 6mm
U (W/m²K)
CAMARA DE AIRE
CAMARA DE ARGON
CAMARA DE AIRE + VIDRIO B.E. (3o'2)
CAMARA DE ARGON + VIDRIO B.E. (3'62)

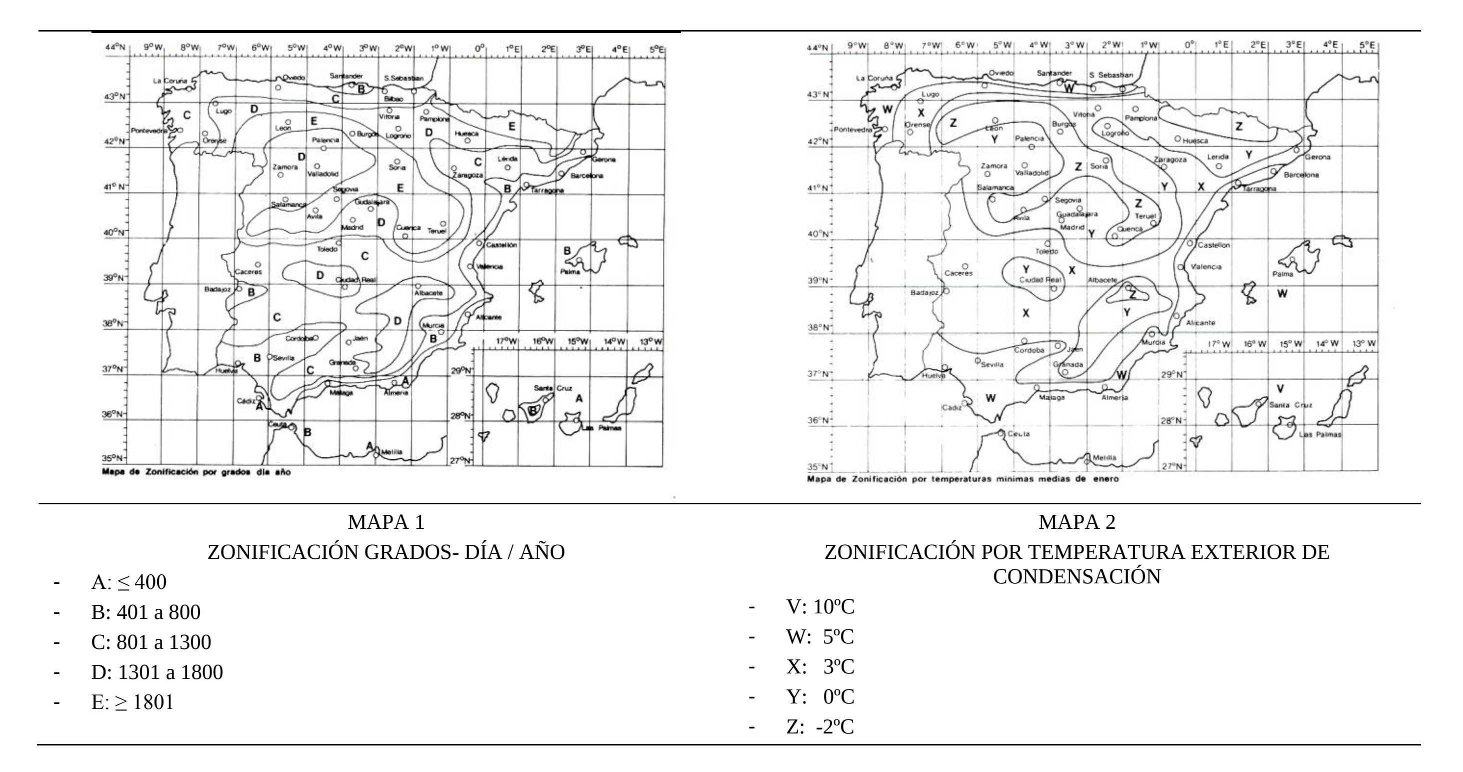
Fig. 34. Fases de la evolución de las Unidades de Vidrio Aislante (U.V.A.).



Cambio de Vidrio monolítico a U.V.A.

Cambio de U.V.A. ordinario a U.V.A. con vidrio de Baja Emisividad

Fig. 35. Rendimiento Medio comparado por el cambio de los vidrios monolíticos a U.V.A. de vidrio ordinario, y de estos a U.VA con vidrio de Baja Emisividad.



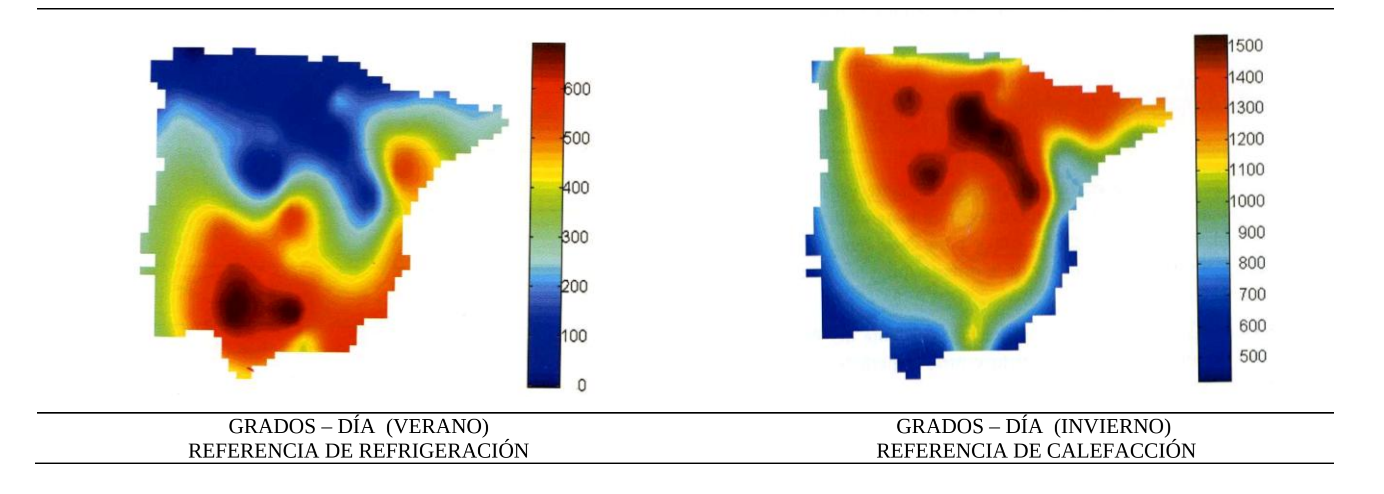
MAPA 1 ZONIFICACIÓN GRADOS- DÍA / AÑO	MAPA 2 ZONIFICACIÓN POR TEMPERATURA EXTERIOR DE CONDENSACIÓN
- A: ≤ 400 - B: 401 a 800 - C: 801 a 1300 - D: 1301 a 1800 - E: ≥ 1801	- V: 10ºC - W: 5ºC - X: 3ºC - Y: 0ºC - Z: -2ºC

Fig. 36. Distribución de Zonas Climáticas según CT-79.

Los gráficos anteriores nos indican que en nuestras latitudes la mayor efectividad se obtuvo con el paso de monolíticos a U.V.A. mientras que el empleo de la B.E. es aceptable en zonas tradicionalmente frías pero no fundamental, para valores climatológicos medios, y esto sin considerar efectos puntuales de climatologías con alto gradiente térmico.

En la antigua Normativa NBE-CT-79 se determinaba la rigurosidad climática repartiendo el territorio nacional en cinco zonas según los grados/día anuales en base 15-15 según Norma UNE-24.046 (Mapa 1) y las temperaturas medias mínimas del mes de enero (Mapa 2). En la Fig. 36 se presentan ambos Mapas. En la Fig. 37 se esquematiza el valor de los Grados/día según las Zonas de la Fig. 36. Según ellas en la Península, con Latitud entre 43º y 36º Norte, predominan las necesidades de calefacción sobre las de refrigeración salvo en zonas muy concretas del Sur, y Sureste peninsular.

Las Islas Canarias, con Latitud 27º y 29º Norte, clima marítimo y con especiales condiciones orográficas, precisan un estudio especial en función de la altitud geográfica de la construcción.



GRADOS – DÍA (VERANO) REFERENCIA DE REFRIGERACIÓN	GRADOS – DÍA (INVIERNO) REFERENCIA DE CALEFACCIÓN

Fig. 37. Esquemas de Grados/día en la Península.

En la Normativa anterior (NBE-CT-79), acaso por ser espejo de otras de países centroeuropeos más fríos, apenas se contemplaban condiciones de verano, lo que ignoraba nuestra Latitud y el aporte solar que significa. En la Normativa actual *C.T.E. DB-HE: Ahorro de energía* se establecen condiciones de Severidad Climática (SC) de invierno y verano, y de acuerdo a ellas las Zonas Climáticas son las siguientes:

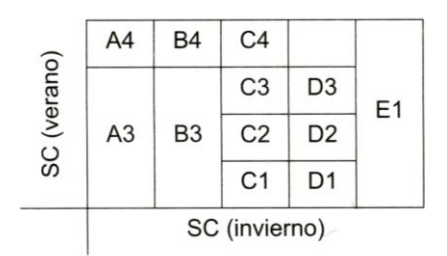


Fig. 38. Zonas Climáticas.

El cuadro se complementa con una Tabla de zonas Climáticas donde se indica la Zona correspondiente a cada Capital de Provincia y las correcciones a aplicar, dentro de cada Provincia, a los diferentes Municipios en función a su altitud geográfica respecto a la Capital. Su resumen para cada Provincia se presenta en el siguiente Mapa de la Fig.39.



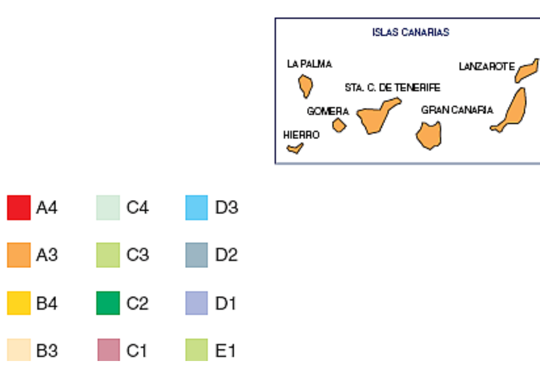


Fig. 39. Mapa Nacional de Zonas Climáticas.

El CTE. DB/ HE 1 marca los límites mínimos para las características de los acristalamientos, función de:

- Zona Climática (SC de verano e invierno).
- Orientación de los huecos (N, S, E, o W).
- Superficie de los huecos en cada orientación (t% sobre superficie de cerramiento).

Un diseño eficaz, adaptado a cada situación geográfica, debería seguir los siguientes pasos:

- Orientación adecuada de los huecos, lo que pocas veces es posible en la ciudad consolidada con edificación mayoritariamente *parietal*, con medianerías, y la situación de ventanas es una imposición del trazado de las calles o en la edificación *abierta*, de bloque exento, en los que el trazado urbanístico pocas veces la tiene en cuenta la orientación adecuada de los viales según la situación geográfica.
- Necesidades de iluminación que determinarán, junto con el uso de las estancias, la orientación y la Zona concreta de situación, la dimensión de los huecos. Podríamos decir: *diseñar para el lugar*.
- Considerar que *calentar* es más barato que *enfriar* y por tanto, ante una decisión sobre una muy elevada protección de invierno con acristalamientos de emisividad muy baja (p.ej. 0’01 ó 0’02) pero con temporadas de radiación solar elevada tendríamos que actuar como Ulises en el estrecho de Mesina frente a *Scylla y Carybdis* dirigiendo el barco al primero, perdiendo seis remeros, antes de zozobrar todos frente al segundo. *Scylla* sería la calefacción y *Carybdis* la refrigeración, y considero que, salvo en casos especiales de alta montaña o climas predominantemente fríos, siempre debemos perder algo en la primera para ahorrar en la segunda.
- Seguir el criterio de *mínimos*, según las recomendaciones de C.T.E. DB/HE 1 antes comentados.

Tabla 20
Valores límites pésimos por Zonas

	U ($W.m^{-2}.K^{-1}$) *[N]*		*g [E/W]*	
ZONA	*11-20%*	*31-40%*	*11-20%*	*31-40%*
A3	4’7	3’8	---	0’48
A4				0’43
B3	3’8	3’0	---	0’45
B4				0’42
C1	3’4	2’6	----	0’56
C2				0’47
C3				0’43
C4				0’41
D1	3’0	2’2	----	0’54
D2				0’46
D3				0’42
E1	3’1	2’2	----	0’54

Los valores reseñados representan necesidades discretas, tanto de Transmitancia Térmica (U) como de Factor Solar.

Como orientación y para posterior comentario, en la Tabla 21 se han resumido los valores límite pésimos de los parámetros característicos, Transmitancia Térmica mínima (U) y Factor Solar máximo (g) de los huecos, vidrio más carpintería, para cada Zona y superficies relativas 11-20% y 31-40%, como medias significativas para edificación residencial de alta densidad (bloques) y de baja densidad (unifamiliar aislada o asociada) en las orientaciones Norte (N) para la Transmitancia (U) y Este/Oeste (E/W) para el Factor Solar (g).

Tabla 21
Valores Límites Mínimos según Zonas y proporción de huecos transparentes de fachada sobre el total

ZONAS DE VALIDEZ		*Valores Característicos (Vidrio 1)*		
		U	*g*	*TL*
11-20%	A3, A4/ B3, B4/ C1, C2, C3	3’07	0’72	80%
31-40%	Ninguna			
		Valores Característicos (Vidrio 2)		
11-20%	Todas			
31-40%	A3, A4/ B3/ C1, C2, C3/ D1, D2/ E1	2’05	0’54	68%
		Valores Característicos (Vidrio 3)		
11-20%	Todas			
31-40%	A3/ C1, C2/ D1, D2/ E1	1’98	0’47	62%
		Valores Característicos (Vidrio 4)		
11-20%	Todas	2’58	0’48	46%
31-40%	A3/ C1			

A continuación se analizan cuatro composiciones y su validez en términos normativos para las exigencias mínimas, todas con Unidades de Vidrio Aislante (U.V.A.):

1. Vidrio exterior incoloro, (ε: 0’89) de 6mm, cámara de aire de 15mm y vidrio interior también incoloro de 6mm.
2. Vidrio exterior Selectivo 76/50, (ε: 0’10) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.
3. Vidrio exterior Selectivo 60/45, (ε: 0’07) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.
4. Vidrio exterior de Control Solar 51/56, (ε: 0’63) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.

A la vista de la Tabla 21 vemos que composiciones de propiedades medias o bajas, incluso la U.V.A. banal de 6 (15) 6 de vidrios incoloros sin ningún tratamiento, cubre demandas mínimas en muchas zonas de nuestro País.

No es la intención de este Capítulo servir como Catálogo de Recetas sino fomentar el análisis antes de la decisión. Los últimos vidrios de capa del mercado tienden a incrementar la Transmisión Luminosa (TL ≥ 60%), reducir la Emisividad (ε ≤ 0’02) y reducir también el Factor Solar (g ≤ 0’30) en una carrera que parece haber olvidado la condición climatológica del lugar.

En la Fig. 40 se representa cualitativamente el escenario térmico en el que el vidrio debe cumplir su función como elemento frontera entre interior y exterior.

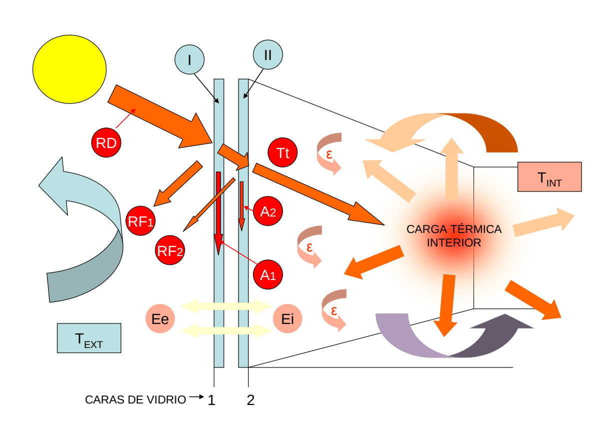
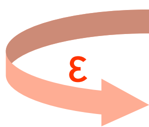
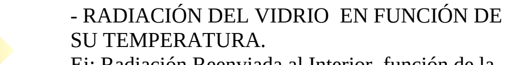
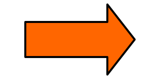


Fig. 40. Escenario térmico completo para un vidrio de fachada

Tabla 22
Definiciones de la Fig.40.

Símbolo	*Significado*
	-ACCIÓN DE LA EMISIVIDAD. La Emisividad (ε) de un vidrio ordinario incoloro de edificación recordemos que es de 0’89. Los vidrios de capa con tratamiento Bajo Emisivo tienen valores que oscilan entre 0’10 ≤ ε ≤ 0’02 en la cara tratada, manteniendo el valor de 0’89 en la otra cara.
	- RADIACIÓN DEL VIDRIO EN FUNCIÓN DE SU TEMPERATURA. Ei; Radiación Reenviada al Interior, función de la Emisividad y de T_{INT}. Ee; Radiación Cedida el Exterior, función de la Emisividad y de T_{EXT}
	- CARGA TÉRMICA INTERIOR. Su valor depende del equilibrio entre ganancias y pérdidas, en régimen variable.
	- RADIACIONES SOLARES: RD; Directa Solar Exterior. RF1; Reflejada por el vidrio exterior. RF2; Reflejada por el vidrio interior. A1; Absorción del vidrio exterior. A2; Absorción del vidrio interior. Tt; Transmitida Total al interior.

En términos generales la radiación solar entra en infrarrojo corto ($\lambda \leq 2500$ nm) mientras el calor generado por ella intenta salir en infrarrojo largo, del mismo modo que lo haría el calor aportado por la calefacción interior en invierno, y en esta cesión hacia el exterior influye de forma fundamental la Emisividad del vidrio (ε), y la Transmitancia Térmica (U) dependiente a su vez del coeficiente de intercambio superficial exterior (h_e), función de la velocidad del viento en el momento (V_v).

Para este esquema se han estudiado las temperaturas de cara interna (2) del acristalamiento en condiciones tipo invernales y estivales y los correspondientes (U) y (g):

Tabla 23
Condiciones de cálculo de Invierno y Verano

Parámetros	*Verano*	*Invierno*
Temperatura exterior	38ºC	-3ºC
Temperatura interior	24ºC	18ºC
Radiación	$740 W.m^{-2}$	$10 W.m^{-2}$
Nubosidad	Despejado	Cubierto
Velocidad de viento	$1 m.s^{-1}$	$11 m.s^{-1}$

El cálculo se ha realizado para las composiciones siguientes:

1. Monolítico incoloro de 6mm.
2 (1) U.V.A., Vidrio exterior incoloro, (ε: 0’89) de 6mm, cámara de aire de 15mm y vidrio interior también incoloro de 6mm.
3 (2) U.V.A., Vidrio exterior Selectivo 76/50, (ε: 0’10) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm
4 (3) U.V.A., Vidrio exterior Selectivo 60/45, (ε: 0’07) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.
5 (4) U.V.A., Vidrio exterior de Control Solar 51/56, (ε: 0’37) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm
6. U.V.A., Vidrio exterior Selectivo 60/28, (ε: 0’02) de 6mm, cámara de aire de 10mm y vidrio interior incoloro de 6mm.

Sus resultados se presentan en la Tabla 24.

Los números asociados a la nomenclatura, n(m) corresponden a las composiciones descritas en la Página 22 empleadas para determinar la validez de uso por Zonas de acuerdo a los mínimos del C.T.E. DB/HE 1.

De esta Tabla y de las anteriores, 20 y 21, podemos deducir que en nuestras Latitudes, para superficies de acristalamiento razonables en edificación residencial (11-20% sobre superficie de fachada exterior) se alcanzan niveles aceptables de equilibrio energético con acristalamientos del tipo 2(1) y 3(2). En el esquema de la Fig. 40, según las condiciones climatológicas exteriores, pueden producirse dos situaciones extremas según las temperaturas exteriores del momento (T_{EXT}) y la velocidad de viento (V_v):

- En una situación de $T_{EXT} \ll T_{INT}$, y velocidad de viento (V_v) media alta, (clima frío o invernal) contar con Baja Emisividad es ventajoso pues retenemos energía interior adquirida de forma gratuita por la Radiación Solar.
- Si las condiciones fueran $T_{EXT} > T_{INT}$, y con viento flojo, (clima cálido o estival) la situación se invierte, la Baja Emisividad de la cara interna del vidrio, con valores bajos ($\varepsilon \leq 0'02$) sería una barrera (*ratonera del calor*) que retendría la energía interior de larga longitud de onda, generada por el Infrarrojo Solar al calentar el interior incrementando la Carga Térmica a eliminar por el acondicionamiento.

También, para las mismas condiciones de invierno, se ha determinado la influencia de las velocidades de viento en la Transmitancia Térmica (U) y el valor de la temperatura de la cara interna del acristalamiento (2) para las composiciones de vidrio 2 (1) y 3 (2), con cámaras de 6, 8, 10, 12 y 15mm. Los resultados se presentan en las Tablas 25 y 26.

En la última fila se presenta, en %, la pérdida de aislamiento por influencia de la velocidad del viento dada por la expresión: $(U_{14m/s} - U_{1m/s}) \times 100 / U_{1m/s}$

En el mejor de los casos, para U.V.A.[S] compuestas con vidrios de B.E. moderada y cámara de aire de 15mm, las desviaciones ocasionales pueden llegar al 8’67% y en el peor, con U.V.A.[S] banales de vidrios incoloros y cámara de 6mm, al 15’15%. En cualquier caso son desviaciones a tener en cuenta en el cálculo de un acristalamiento eficiente.

Tabla 24
Características térmicas y Temperaturas de cara interna, en Verano e Invierno, para varios tipos de acristalamientos

	Verano				*Invierno*			
Composición	*U ($W.m^{-2}.K^{-1}$)*	*g*	*T.1 (ºC)*	*T.2 (ºC)*	*U ($W.m^{-2}.K^{-1}$)*	*g*	*T.1 (ºC)*	*T.2 (ºC)*
1	5’41	0’87	34’80º	34’30º	8’94	0’85	1’90º	3’20º
2 (1)	3’72	0’73	40’20º	33’50º	3’42	0’72	-1’10º	12’5º
3 (2)	2’33	0’53	47’30º	32’00º	2’20	0’51	-1’70º	14’50º
4 (3)	2’23	0’46	47’60º	31’40º	2’12	0’44	-1’70º	14’60º
5 (4)	3’05	0’48	50’00º	33’60º	2’82	0’44	-1’30º	13’50º
6	2’06	0’28	48’20º	30’00º	1’98	0’26	-1’80º	14’80º

Tabla 25
Composición 2 [1] [6 Incoloro (Cámara/ S) 6 Incoloro]

	U ($W.m^{-2}.K^{-1}$) *para espesor de Cámara (S)*				
Velocidad de viento	*6mm*	*8mm*	*10mm*	*12mm*	*15mm*
1 m/s	3’63	3’41	3’26	3’16	3’06
5 m/s	3’92	3’67	3’50	3’38	3’27
10 m/s	4’11	3’83	3’64	3’51	3’40
14 m/s	4’18	3’89	3’70	3’57	3’46
Reducción de U	15’15 %	14’08%	13’50 %	12’97%	12’66%

Tabla 26
Composición 3 [2] [6 SE.76/50 (Cámara/ S) 6 Incoloro]

	U ($W.m^{-2}.K^{-1}$) *para espesor de Cámara (S)*				
Velocidad de viento	*6mm*	*8mm*	*10mm*	*12mm*	*15mm*
1 m/s	2’71	2’32	2’05	1’86	1’72
5 m/s	2’87	2’44	2’14	1’94	1’79
10 m/s	2’97	2’51	2’20	1’99	1’84
14 m/s	3’01	2’54	2’22	2’01	1’86
Reducción de U	11’00%	9’50%	8’30%	8’06%	8’67 %

Las temperaturas de la cara interna del acristalamiento, en temporada invernal, son también fundamentales para determinar los riesgos de condensación sobre ella, a continuación se adjunta un cuadro psicrométrico con un ejemplo de cálculo de riesgo de condensaciones. En este cálculo participan, por igual, las siguientes variables:

- Temperatura ambiente de la estancia (T_i).
- Humedad relativa interior del local (H_r).
- Temperatura superficial de los elementos en contacto con el interior, en nuestro caso del vidrio.

No debemos olvidar que *las tres variables están relacionadas*, y para evitar las condensaciones las tres deben ser estudiadas pues *variar sólo una de ellas no servirá más que para remitir el problema a las otras dos.*

En el ábaco de la Figura 42:

- Caso 1: Para Temperatura Interior; T_i = 26º, Humedad Relativa; H_r=50% se producirá condensación sobre toda superficie interior a T≤ 11ºC, (ruta -).
- Caso 2: Para T_i = 22º; H_r = 50% la condensación aparecerá en superficies a T≤ 11’5ºC, (ruta ----).
- Caso 3: Para T_i = 25º, Humedad Relativa; H_r = 80% se producirá condensación T ≤ 21ºC, (ruta -------).

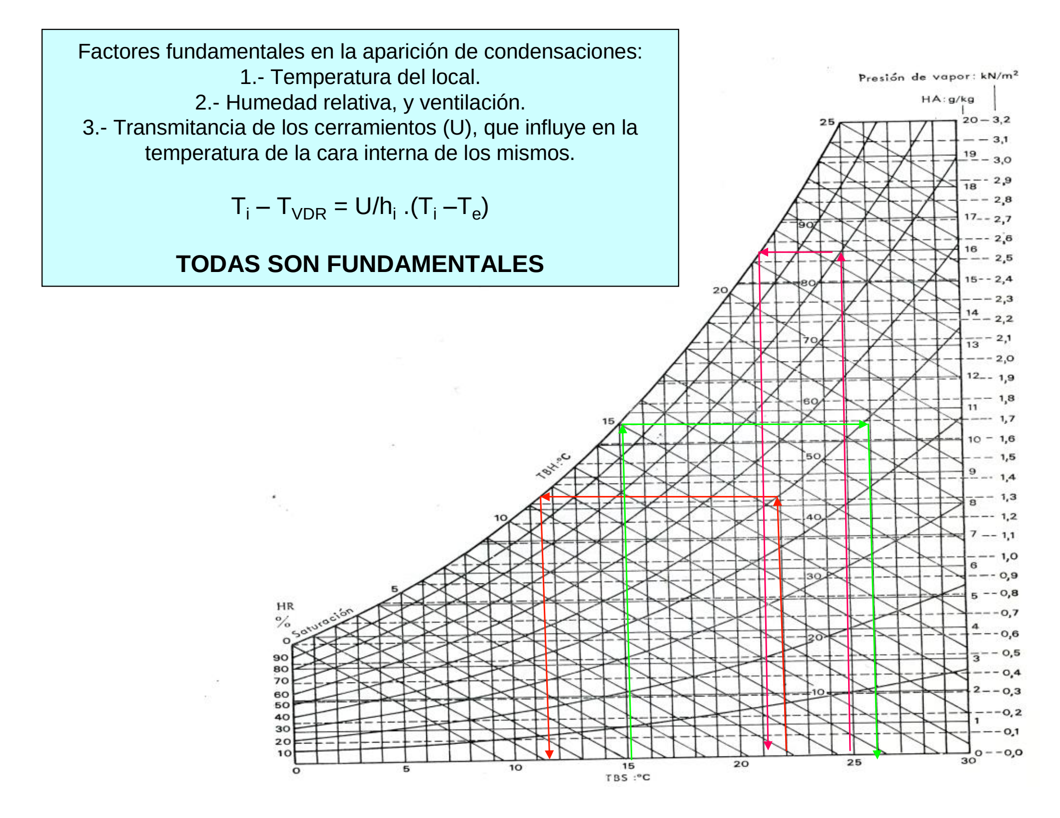


Fig. 42. Ábaco psicrométrico.

En la Tabla 27 se resumen las características genéricas comunes de los vidrios de capa magnetrónica, para edificación residencial, según sus últimas tendencias de fabricación y algún comentario sobre las mismas.

Tabla 27
Características básicas de los vidrios de capa magnetrónica y consideraciones para su empleo

Característica	*Comentarios*
Alta Transmisión Luminosa (TL ≥ 60%)	-En latitudes altas es primordial pues la menor intensidad de radiación del Sol exige más superficie de iluminación y la máxima Transmisión Luminosa a los vidrios. -En latitudes bajas su exceso puede obligar a disponer protecciones para reducir el efecto de deslumbramiento, persianas, toldos, voladizos, etc. o realizar huecos menores. -En cualquier caso la luz transmitida, debe ser neutra y no alterar significativamente la calidad del color percibido con ella, Factor de Colorimetría (RC ≥ 90).
Emisividad muy reducida (ε ≤ 0’02)	-En latitudes altas con climatología predominantemente fría, es muy útil para evitar perdidas de calor por radiación del vidrio, considerando además que la escasa iluminación natural conduce a huecos de mayor dimensión y por tanto mayores pérdidas. -En latitudes bajas nos remitimos a la descripción del *rebote de calor hacia el interior* descrito anteriormente sobre la Fig. 40. -Con determinados tipos de carpintería, también en latitudes bajas, pueden aparecer riesgos de rotura por diferencia térmica que podrían obligar a templar los vidrios (nos remitimos al *Apdo. 4. Comportamiento mecánico del vidrio).*
Factor Solar bajo (g≤ 0’3)	-En latitudes altas reduce el aporte natural de calor solar por lo que no es recomendable en climas fríos. -Por el contrario en latitudes bajas es necesario para reducir el aporte de calor solar y el incremento de carga térmica.

3.4. Evolución de los acristalamientos exteriores. Nuevas tendencias

En el año 1991, un estudio de José Antonio Coto, Director de Investigación y Desarrollo de Cristalería Española S.A. [3], comentaba de forma esquemática y magistral, el *“estado del arte”* del vidrio en aquellos momentos. No deja de sorprender que, además de los tipos de vidrio hasta aquí descritos, absorbentes, reflectantes de tipo pirolítico y magnetrónico (tanto de control solar como de baja emisividad) y las Unidades de Vidrio Aislante (U.V.A.) con cámara de aire o de gas, se hablaba de otros que aún hoy, después de 21 años, se conocen de forma tímida, a saber:

- De propiedades variables, *Termocrómicos, Fotocrómicos y Electrocrómicos*, que varían sus propiedades de Transmisión Luminosa y Color con el calor, la radiación solar o la corriente eléctrica respectivamente.
- Fotovoltaicos productores de energía eléctrica bajo la acción solar que, en el momento actual, se fabrican por métodos de deposición de multicapas en cámara de vacío y cuya transparencia es controlable, permitiendo el paso de la luz y la visión en la medida deseada y han liberado al vidrio de su función de soporte de las opacas células conocidas actualmente (B).
- *Autocalefactores*, vidrios de capa magnetrónica que con el paso de la corriente eléctrica se convierten en radiadores de calor o laminados con conductores metálicos de sección mínima inscritos en el intercalario y prácticamente invisibles.

Aunque algunos de ellos no tienen espacio de uso común en la Arquitectura su existencia abre vías de pensamiento e investigación futura como la descrita a continuación de la que ya existe alguna aplicación.

Hasta ahora sólo hemos hablado de acristalamientos *estáticos*, en el sentido de la invariabilidad de sus propiedades en función de sus componentes, vidrios de capas, cámara etc., es decir el acristalamiento frente a la climatología siempre es el mismo y tiene los valores físicos determinados en Laboratorio de acuerdo a la UNE-EN: 410.

Pero desde el año 2007 existen vías de investigación y experiencias que, actuando sobre la cámara del acristalamiento y su relleno, consiguen variar sus propiedades en función de la estación y las necesidades, aprovechando la propiedad del agua como absorbente de radiación o depósito de calor.

Conocida es la elevada absorción del agua, frente a la Radiación Solar, en los segmentos de Ultravioleta ($300 \leq \lambda \leq 380$) e Infrarrojo Solar ($750 \leq \lambda \leq 2400$), por consiguiente interponiendo una lámina de agua entre el Sol y nosotros se reduce sobremanera la radiación recibida sin apenas alteración de la luz transmitida.

En este proceso el agua se calienta por lo que es necesario refrigerarla para que siga cumpliendo su función de aislante de calor.

Por otra parte, si esa lámina de agua se calienta en momentos de frío exterior formará un *muro de calor* entre el exterior y nuestra estancia, reduciendo también las pérdidas energéticas.

Este sistema ya se había empleado con aire, como elemento caloportador, en acristalamientos de vidrios monolíticos en doble piel haciendo circular aire caliente entre los dos vidrios.

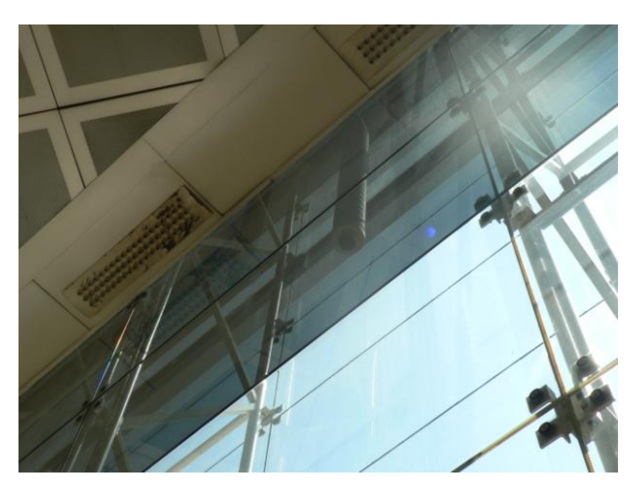


Fig. 43. Detalle de toberas en la doble piel de fachada del Aeropuerto de Barcelona anterior al actual.



Fig. 44. Consejo Consultivo de la C.A. de Castilla y León (Arqto. Alberto Campo Baeza).

La investigación sobre estas premisas, que se inició hace bastantes años, chocaba con problemas insalvables en aquellos momentos como eran la gran presión hidrostática que el agua producía en los vidrios y las instalaciones de calentamiento y refrigeración del agua empleada como caloportador.

En el año 2007 la E.T.S.I.A. de la U.P.M. comenzó a desarrollar, amparada por el Programa de creación de empresas *Actúa UPM*, el Proyecto de I+D+i que, en el momento actual ha generado un nuevo tipo de vidrio aislante activo de cámara de agua (A) y sistemas de micro intercambiadores de calor que empleando exclusivamente vidrios incoloros laminados de seguridad y variando la temperatura del agua de la cámara ha conseguido resultados esperanzadores para este sistema.

Las ventajas del método son las siguientes:

1. Empleo exclusivamente de vidrios incoloros laminados habituales en edificación en estado natural.
2. Obtener una transparencia prácticamente total y natural, sin apenas alteración de la calidad de luz recibida.
3. Conseguir acristalamientos *activos frente a la excitación climática recibida*, de modo que el mismo acristalamiento es válido para estaciones invernales y estivales manteniendo una temperatura del vidrio interior prácticamente uniforme, y sin grandes diferencias con la del ambiente de la estancia, pues depende de la temperatura del agua de la cámara controlada por los intercambiadores de calor.
4. Eliminar el efecto de rebote de calor por radiación de los vidrios interiores hacia la estancia.
5. Eliminación de los efectos de las presiones *isócoras*, que veremos en el *Apartado 4. Comportamiento mecánico del vidrio.*

Y sus desventajas:

1. La ausencia de experiencia amplia de su comportamiento a largo plazo, pues las obras realizadas son muy recientes.
2. El empleo de mecanismos activos, bombas, intercambiadores, etc… para mantener la temperatura y circulación del agua (caloportador). Con esto es necesario un mantenimiento regular soportable que no encarezca el uso con el tiempo.
3. Garantías de los sellantes frente a la presión hidrostática.
4. Limitaciones de dimensión en el caso de grandes superficies por problemas mecánicos de resistencia a la presión, aunque se han instalado piezas, en algunas ocasiones, con altura de suelo a techo.

4. Comportamiento mecánico del vidrio

En este apartado no analizaremos el cálculo mecánico del vidrio para fachadas en general, ni su uso como estructura, sino aquellos problemas de fractura inducidos por un inadecuado uso de vidrios en fachada, es decir, aquellos casos cuya patología se derive de problemas térmicos y de la influencia de elementos secundarios que acompañan en ocasiones al acristalamiento tales como cortinas interiores, determinados tipos de carpintería, sombras arrojadas, etc.

Considerando que el vidrio no es un material cristalino, su resistencia teórica depende de la resistencia del enlace de Si-O cuya variación de fuerzas de unión corresponde con una función sinusoidal según la expresión [1]:

$$\sigma = \sigma_t \cdot sen \frac{2\pi x}{\lambda}$$

Para:

- σ_t: Tensión teórica para separar un átomo de Sílice (Si) de otro de Oxígeno (O).
- $\lambda/2$: Intervalo de variación de las fuerzas interatómicas.
- a_0: Distancia interatómica de equilibrio en el caso de que no exista ninguna tensión de tracción según el eje *x*.

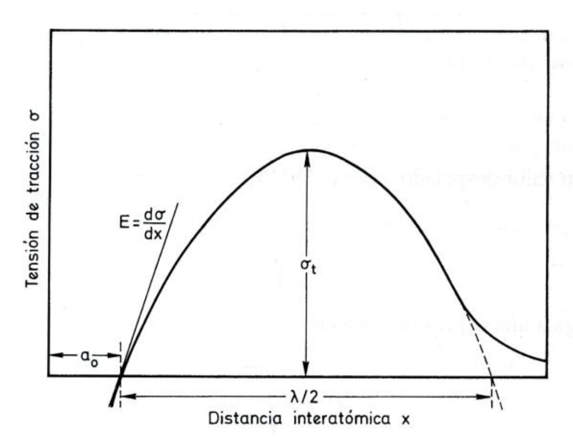


Fig. 45. Variación de las fuerzas de cohesión en función de la distancia de separación interatómica.
[1] EL VIDRIO. Propiedades Mecánicas Apdo. 14.4. Fig.254.

La variación de la tensión en función de a_0 es:

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\pi\sigma_t}{\lambda} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$$

Para valores de x muy pequeños, $x \approx a_0$, $(2\pi x/\lambda) \approx$ 1'00 y con E de valor ($7'2.10^4$N/mm^2) se obtiene la expresión:

$$\sigma_t = \frac{E\lambda}{2\pi a_0}$$

El desarrollo de esta fórmula para:

- λ / a_0 : Cte.
- E: $d\sigma/dx = 7'2.10^4$N/mm^2

Proporciona un valor de la resistencia teórica del vidrio plano recocido de $\sigma_t \approx 2'2.\ 10^4$N/mm^2.

La resistencia real obtenida por ensayos ($\sigma_{g;k}$) de una placa de vidrio plano recocido es $\leq$ 50N/mm^2, notablemente menor que la teórica (σ_t) admitiéndose que la desviación se debe, según la teoría generalmente aceptada, a las irregularidades, microfisuraciones elípticas o *bolsas* que surcan la superficie del vidrio debidas al enfriamiento o a la abrasión por su manipulación normal.

Inglis, en 1913, [4] fue el primero en considerar a las microfisuras superficiales del vidrio plano como responsables de su resistencia real y Littleton afirmó, algunos años después, que *medir la resistencia mecánica del vidrio es determinar la debilidad de su superficie*.

La humedad también cumple un papel importante en la rotura del vidrio pues el agua puede actuar penetrando en las microfisuras y producir una corrosión química, bajo una situación de tensión, cuyo efecto es ir haciendo más profunda la *bolsa* lo que reduce el radio r_g y acelera el proceso de fractura [5].

Por último la persistencia de la carga, su tiempo de aplicación, también influye negativamente en la resistencia produciendo una situación de fatiga que incrementa el efecto anterior.

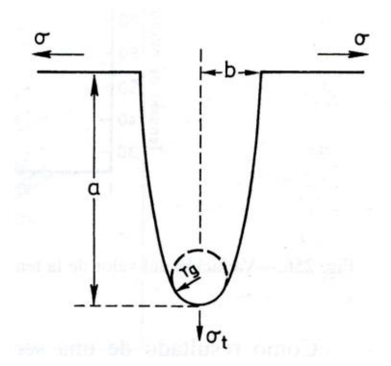


Fig. 46. Esquema de una microfisura elíptica y el esquema de tensiones que determina su evolución.
[1] EL VIDRIO. Propiedades Mecánicas Apdo. 14.4. Fig.255.

Pero aparte de estos razonamientos físico-químicos cuyo nivel de actuación es microscópico, existe otro fundamental a nivel macroscópico que es el estado del borde del vidrio tras su proceso de corte.

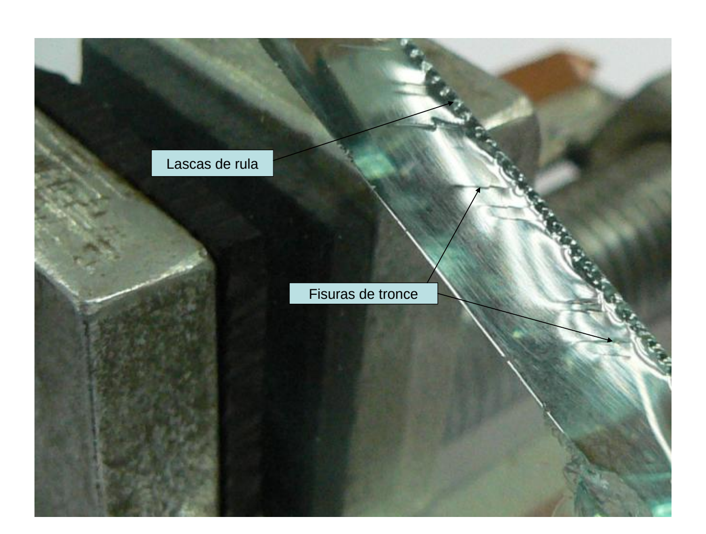
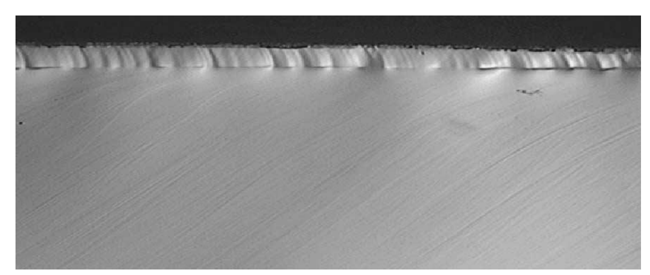


Fig. 47. Aspecto del borde de un vidrio a "canto vivo" sin pulir.

El corte industrial del vidrio monolítico sigue realizándose, en casi todos los casos, en mesas horizontales donde una *rula* rasga superficialmente la hoja para, posteriormente, *tronzarla* en un proceso mecánico de flexión que abre la rasgadura. En este proceso se producen fisuraciones de borde, apreciables en la Fig.47 y en la siguiente Fig. 48 [6].

A la vista de estas imágenes vemos que los primeros razonamientos sobre la teoría de rotura basados en evolución de microfisuras sólo tienen validez para cantos de vidrio en los que se haya eliminado la irregularidad del corte industrial mediante un pulido de canto y biselado de bordes, lo que se denomina canto pulido industrial, borde deslustrado sin brillos o borde pulido según la UNE EN-12150. Parte 1.



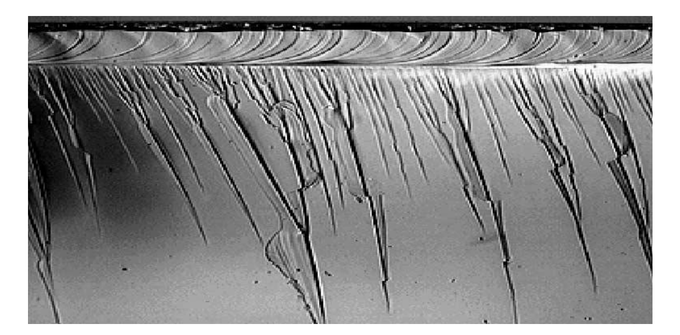


Fig. 48. Fisuras del borde de corte de un vidrio a "canto vivo" sin pulir. El borde superior corresponde al de desplazamiento de la rula. [6] DECOUPE A VERRE PLAT. S.G. Recherche.

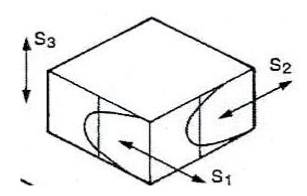
Una de las causas más frecuentes de rotura de vidrios es el mal estado de sus cantos y las saltaduras o *lascas* producidas en las manipulaciones de transporte y colocación.

Para un buen estado de bordes el vidrio plano recocido tiene una resistencia característica, según prEN 13474. Parte 1, de $f_{g;k} = 45N/mm^2$.

La resistencia del vidrio recocido habitual puede mejorarse mediante el temple que puede ser térmico o químico, aunque en edificación sólo se aplica industrialmente el primero.

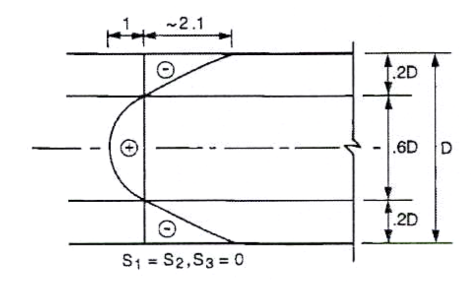
El proceso de templado térmico consiste en calentar al vidrio en un horno horizontal con resistencias eléctricas hasta el *intervalo de transición*, temperaturas entre 650ºC y 700ºC aproximadamente, enfriándolo inmediatamente con una fuerte corriente de aire frío simétrica por ambas caras durante un tiempo entre 15s y 20s, según la temperatura alcanzada en el calentamiento.

El resultado es justo el contrario del conseguido en el *arca de recocido*, en la que se enfría al vidrio intentando que las tensiones de enfriamiento sean las mínimas. En el soplado del temple se intenta conseguir tensiones de compresión muy elevadas en las caras exteriores de la hoja de vidrio con el fin de *cerrar microfisuras* reduciendo su efecto negativo en la resistencia del vidrio.



Dirección de las tensiones

Fig. 49. Tensiones incorporadas a un vidrio por templado térmico. [7] STRUCTURAL USE OF GLASS AND BUILDINGS.



Distribución en el espesor del vidrio

Fig. 50. Tensiones incorporadas a un vidrio por templado térmico [7] STRUCTURAL USE OF GLASS AND BUILDINGS.

El esquema de tensiones genéricas obtenidas se presenta en las Fig. 49 y 50 [7].

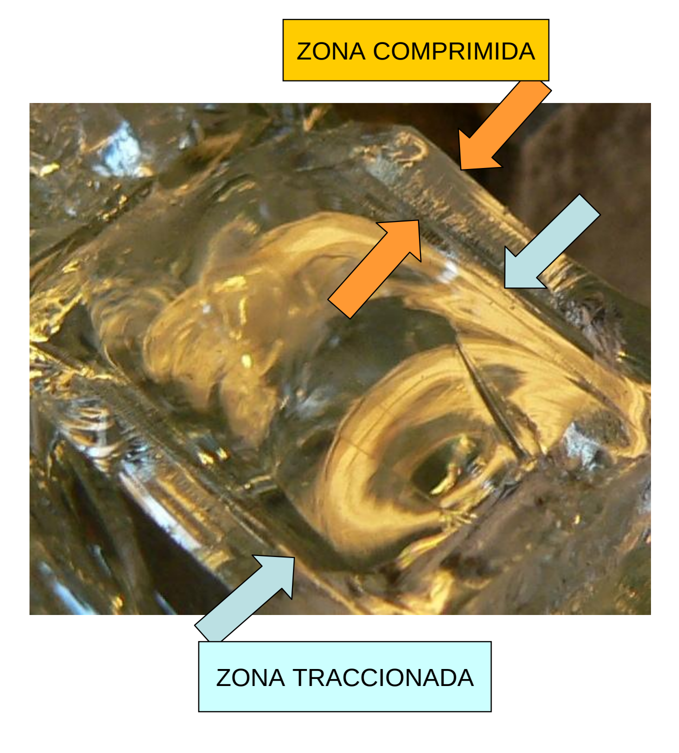


Fig. 51. Vista del canto de un fragmento de vidrio templado fracturado donde reaprecian las diferentes zonas de tensión y su profundidad.

Con este proceso el valor de la resistencia característica del vidrio plano sube a $f_{g;k} = 120N/mm^2$, aunque esta considerable ganancia lleva aparejado un aumento en la sensibilidad a rotura pues, como sabemos, un impacto de cuerpo muy duro en las proximidades del borde o en el canto de la pieza, que llegue a penetrar en la zona comprimida superficial, conlleva la rotura total de la misma provocada por la liberación de las tensiones de tracción confinadas en su interior.

Otro efecto a tener en cuenta producido por el temple en el vidrio plano es la *anisotropía*, fenómeno óptico de los materiales que poseen entre otras la propiedad de la *fotoelasticidad* y manifiestan de forma visible sus tensiones internas, cuando se ven bajo luz polarizada que puede ser la luz indirecta solar.

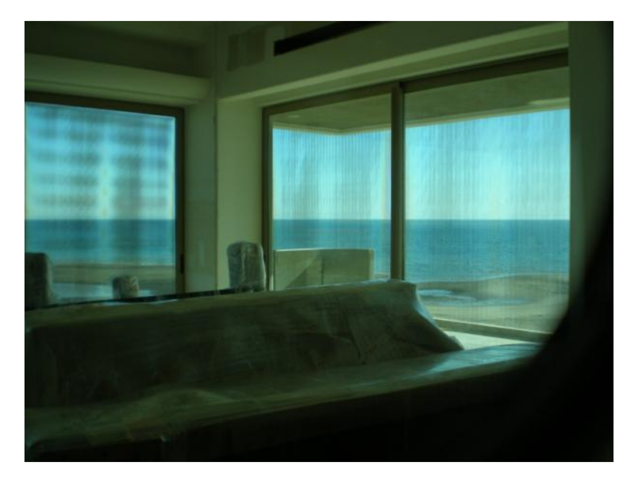


Fig. 52. Anisotropía en vidrios templados.

El valor de las $f_{g;k}$ sirve de base para el cálculo de las tensiones admisibles $f_{g;d}$, cuyos valores más comunes para el vidrio plano flotado común en edificación se dan en la Tabla 4.1, tomada del Proyecto de Norma Europea prEN 13474. Vidrio para la Edificación. Diseño de los Acristalamientos. Parte2: Cálculo de cargas uniformes.

Tabla 28

Tensiones admisibles del vidrio según su tratamiento y duración de la carga. (N/mm^2)

Producto vítreo		*Duración de la carga uniformemente repartida*					
	Tratamiento	Corta (Viento)		Media (Nieve, Climáticas)		Larga (Peso propio, altitud)	
Tipo		ELU	ELS	ELU	ELS	ELU	ELS
Float plano	Recocido	17	30	9	15	6	12
	Templado	49	81	41	65	39	62
	Termoendurecido	28	47	19	32	17	28

Repetimos que estos valores dependen en alto grado del estado de los cantos de las piezas y un corte inadecuado que produzca fisuración de tronce excesiva (Fig. 47 y 48) o cualquier golpe en el canto durante las operaciones de transformación o montaje, que origine una lasca en él, producirá la prematura ruina del vidrio independientemente de los valores de resistencia teórica de la Tabla 28.

El vidrio, por ser mal transmisor del calor, puede mantener en su masa temperaturas diferentes en una misma pieza; se puede decir que la radiación calienta *al vidrio que ve*. Muy significativa es la Fig. 53 en la que se aprecia un acristalamiento expuesto a radiación y sombras de forma simultánea, por el voladizo y el pilar inmediatos, en el que se produce esa diferencia de temperatura marcada por la absorción energética del vidrio (AE) y la ventilación de su superficie (velocidad del viento) variable a lo largo del día.



Fig. 53. Sombras arrojadas sobre un acristalamiento por elementos constructivos externos.

En los acristalamientos los casos más habituales de este fenómeno se pueden tipificar en los siguientes:

- Sombras arrojadas por elementos de fábrica, dinteles jambas, voladizos o cuerpos de construcción como chimeneas, o edificaciones próximas.
- Persianas exteriores a medio bajar que impiden la radiación uniforme sobre el vidrio.
- Cortinas o estores a medio desplegar en el interior, próximos al acristalamiento, y con ventilación insuficiente entre ambos, y en general cualquier elemento opaco mobiliario, etc. pegado al acristalamiento.
- Papeles o láminas adheridas al vidrio por el interior.
- Acristalamientos instalados en carpinterías de corredera que en situación de abertura parcial producen idéntico efecto al de las cortinas para el vidrio exterior.
- Un caso particular del anterior es el apilamiento en los caballetes de obra de los acristalamientos de forma irregular, con algunas piezas salientes respecto al resto, y expuestos a radiación solar.

La diferencia de temperatura, o choque térmico, entre dos puntos de una misma lámina de vidrio es por consiguiente una carga adicional que debe soportar nuestro acristalamiento y no conviene olvidar.

El choque térmico que puede soportar un vidrio se determina de forma teórica de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\Delta T = \frac{[2 \times fg;d \times (1-\mu)]}{(\alpha \times E)}$$

Para:

- ΔT = Diferencia de temperatura admisible entre dos puntos de un mismo volumen.

- *fg;d* = Tensión admisible de flexotracción para el vidrio bajo cargas de duración media.
- μ = Coeficiente de Poisson (μ = 0.22).
- *E* = Módulo de elasticidad longitudinal (7’2·10^{4}N/mm^2).
- α = Coeficiente de dilatación térmica (9×10^{-6} K^{-1}).

Su aplicación da los siguientes valores teóricos de ΔT para cada tipo de tratamiento:

Tabla 29
Diferencias térmicas límite para cada Estado Límite y tipo de tratamiento en el vidrio

	Estado Límite	
Tratamiento	*ELU*	*ELS*
Recocido	20’50ºC	36’80ºC
Templado térmico	98’90ºC	194’20ºC
Termoendurecido	46’70ºC	77’00ºC

Estos valores son los teóricos, bastante conservadores, y nos indican que en caso de riesgo por choque térmico la mejor decisión es templar los vidrios o por lo menos someterlos a un termoendurecido o *temple corto*.

Tabla 30
Límites del salto térmico para cada situación y tipo de vidrio de acuerdo a la Norma Francesa NF P 78-201-1

CRITERIOS : Diferencias de temperaturas admissibles para los vidrios recocidos (* NF P 78-201-1)

Inclinacion (grados)	90 > ß > 60	60 > ß > 30	30 > ß > 0
Monolitico, borde bruto de corte	34 (31)	31 (28)	27 (25)
Monolitico, borde esmerilado	41 (37)	37 (33)	33 (29)
Laminado simétrico, medida fija, borde bruto de corte	34 (31)	31 (28)	27 (25)
Laminado simétrico, medida fija, borde esmerilado	41 (37)	37 (33)	33 (29)
Laminado simétrico, cortado, borde bruto de corte	29 (26)	26 (23)	23 (20)
Laminado asimétrico, medida fija, borde bruto de corte	26 (23)	23 (21)	21 (19)
Laminado asimétrico, medida fija, borde esmerilado	34 (31)	31 (28)	27 (25)
Laminado asimétrico, cortado, borde bruto de corte	24 (22)	22 (20)	19 (18)
Vidrio o luna armada	24 (22)	22 (20)	19 (18)
Vidrio impreso	31 (28)	28 (25)	25 (22)

* Acristalamiento apoyado perimetralmente
* Carpinteria con baja inercia térmica (Carpinterias de baja inercia)

En ella se precisan algo más estos criterios en función del estado de cantos, tipo de vidrio, carpintería y apoyo de la lámina.

Los riesgos térmicos sólo aparecen en los acristalamientos bajo los efectos de la radiación solar, salvo casos excepcionales. Para comprobar sus efectos se estudiarán las temperaturas de los vidrios bajo condiciones de radiación en verano para acristalamientos de los tipos descritos más habituales.

La composición de los acristalamientos a comprobar en las situaciones descritas se detallan en la Tabla 31, todas de vidrios de 6mm de espesor y cámara de aire de 15mm.

Tabla 31
Tipos de acristalamiento estudiados térmicamente

	Composición		
Vidrio	*Vidrio exterior*	*Cámara*	*Vidrio interior*
1	Incoloro	Aire de 15mm	Incoloro
2	Control solar Protección/20		Incoloro
3	Bajo Emisivo ε = 0’04		Incoloro
4	Selectivo 70/54 ε = 0’10		Incoloro

Las condiciones de obstrucción consideradas han sido las siguientes:

A. Persiana exterior, con ventilación natural
B. Cortina o estor interior, próximo al vidrio, con ventilación reducida entre ambos.
C. Carpintería de corredera a medio abrir.

Las condiciones climatológicas serán las de verano según los datos pésimos ya empleados en el Apartado 3.

Tabla 32

Parámetros	*Verano (día)*
Temperatura exterior	36ºC
Radiación	740W.m^{-1}
Nubosidad	Despejado
Velocidad de viento	1m.s^{-1}

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 33, considerando que (I) es el vidrio exterior y (II) el interior.

Tabla 33
Temperaturas de cada vidrio

Acristalamiento y condición de uso		Temperatura de los vidrios			
		Sin obstrucción		Con obstrucción	
Vidrio	Tipo	I	II	I	II
1	A	42ºC	37ºC	52ºC	35ºC
	B			51ºC	63ºC
	C (1)			50ºC	59ºC
				62ºC	41ºC
	A	63ºC	38ºC	57ºC	35ºC
	B			68ºC	53ºC
	C (1)			71ºC	66ºC
				61ºC	36ºC
3	A	47ºC	34ºC	59ºC	31ºC
	B			52ºC	62ºC
	C (1)			55ºC	88ºC
				87ºC	38ºC
4	A	52ºC	34ºC	60ºC	31ºC
	B			57ºC	58ºC
	C (1)			60ºC	87ºC
				86ºC	37ºC

NOTAS: (1) Los dobles valores de las Temperaturas en este caso corresponden: el superior, al acristalamiento que desliza por el exterior; y el inferior, al acristalamiento que desliza por el interior.

Los choques térmicos para los casos estudiados, en cada acristalamiento y condición de uso, serán:

Tabla 34
Diferencias térmicas

Acristalamiento y condición de uso.		*Choque Térmico (ΔT)*	
T	*Tipo*	*Vidrio I*	*Vidrio II*
1	A	10ºC	2ºC
	B	5ºC	15ºC
	C [(1)]	8ºC	*22ºC*
		20ºC	4ºC
2	A	6ºC	3ºC
	B	5ºC	15ºC
	C [(1)]	8ºC	*28ºC*
		2ºC	2ºC
3	A	12ºC	3ºC
	B	5ºC	*28ºC*
	C [(1)]	8ºC	*54ºC*
		40ºC	4ºC
4	A	8ºC	3ºC
	B	5ºC	*24ºC*
	C [(1)]	8ºC	*53ºC*
		34ºC	3ºC

A la vista de los resultados sería preciso tomar las siguientes precauciones:

- Riesgos *ligeros y medios* (1-2/C; 3-4/B): Bastaría un pulido de cantos con borde deslustrado sin brillo (canto pulido industrial en *argot* vidriero).
- Riesgos *altos* (3-4/C): Templado térmico.

Los resultados obtenidos indican que el empleo de vidrios con emisividades muy bajas (ε ≤ 0'07) debe considerarse con cautela en climas donde la radiación solar durante algunas estaciones y periodos del día sea alta, *para carpinterías de corredera en las que los vidrios puedan superponerse*. Las conclusiones generales de lo anterior serían:

1. Las persianas exteriores, toldos o cualquier otra obstrucción solar externa ventiladas y a una distancia ≥150-200mm del acristalamiento no deben ocasionar problemas especiales siempre que la Absorción Energética del vidrio exterior sea AE ≤ 30/40%.
2. Cuando se empleen vidrios exteriores de B.E. o Selectivos con emisividad ε ≤ 0'06, con carpinterías de corredera que permitan la superposición ocasional de los vidrios, deberán emplearse vidrios con borde deslustrado sin brillos (UNE-EN 12150. Parte 1) canto pulido industrial en el *argot* vidriero, y si ε ≤ 0'04 estudiar la necesidad de un templado térmico en función de la climatología del lugar.
3. El almacenamiento de los acristalamientos en obra debe realizarse, a ser posible, en recintos protegidos de la intemperie y siempre cubiertos.

Otro fenómeno a considerar en las Unidades de Vidrio Aislante (U.V.A.) es el comportamiento dinámico del aire de la cámara por dos causas:

- Diferencia de altura geográfica entre el lugar de fabricación y el de montaje.
- Diferencias de temperaturas y cambios barométricos durante la vida de la U.V.A., ya colocada en la fachada.

Las transformaciones que puede sufrir un gas encerrado en un recipiente pueden ser de los siguientes tipos:

- Isotermas, a Temperatura es constante (T = cte.).
- Isobáricas, a Presión constante (p = cte.).
- Isócoras, a Volumen constante (V = cte.).

Esta última afecta al gas de la cámara de las U.V.A.[S] que, por su condición de estanca, no altera su volumen. Supongamos que una U.V.A., cuyo gas de la cámara tiene valores de Presión, Volumen y Temperatura en las condiciones de clima y altura geográfica del lugar de fabricación en el momento de su sellado, se traslada a otro lugar y se monta a una altura diferente de la de fabricación y a otras condiciones climatológicas. Esta circunstancia produce los siguientes cambios:

- Diferente presión exterior debida a la diferencia de altura topográfica diferencial, (fija).
- Diferente presión exterior barométrica por la situación meteorológica, (variable).
- Temperatura diferente que dilata o retrae al gas de la cámara (variable).



Fig. 54. Aspecto de un acristalamiento sometido a los efectos de las presiones "isócoras" en su cámara.

Este proceso, que se produce en una cámara estanca sin comunicación con el exterior, induce acciones mecánicas en los vidrios de la U.V.A. de Presión o Succión. El efecto visual, es muy acusado en acristalamientos fabricados con vidrios de alta reflexión

luminosa, y se puede apreciar en la Figura 54. Las presiones y succiones sobre los vidrios se presentan esquemáticamente en la Figura 55.

En determinados casos estas acciones pueden llegar a romper los vidrios componentes como lo haría cualquier acción de viento, pero con el agravante de ser cargas de larga duración, las correspondientes a diferencia de altura, y de media duración, las producidas por cambios climatológicos. Por tanto, se deben evaluar estas acciones en los siguientes casos:

1. Cuando el montaje se vaya a realizar en una zona muy distinta, geográfica y climatológica, a la de fabricación.
2. Cuando en el transporte el vidrio vaya a sufrir cambios de altura considerables, paso de puertos de montaña, o se realice por medios como barco o avión. En este caso al ser una situación no permanente puede dotarse a la cámara de la Unidad de Vidrio Aislante (U.V.A.) de una válvula de equilibrado que garantiza su estanquidad y el equilibrio entre presión externa e interna.

EXTERIOR — INTERIOR

(b) 4 + 6 6 (c) + 6 6

DEPRESIÓN EXTERNA | SOBREPRESION EXTERNA

Fig. 55. Esquema de isócoras en una U.V.A.
[8] prEN 13474. Parte 1: Fig. B-1.

Las presiones *isócoras* obtenidas deberán combinarse con las correspondientes al resto de acciones: viento, sobrecargas de uso, etc. considerando, como antes hemos indicado, que para la determinación de la Tensión Admisible en el vidrio su duración es *media*, para los cambios climatológicos (Temperatura y Presión Barométrica) y *larga*, para la diferencia de altura geográfica y de construcción entre el lugar de fabricación y el de montaje (Tabla 28), aunque esta última puede evitarse, como ya dijimos para el caso de transportes especiales, o para diferencias significativas de altura geográfica, empleando válvulas de equilibrado que se sellarán tras el montaje.

La determinación de las acciones *isócoras* sobre los vidrios se puede realizar por el procedimiento detallado a continuación propuesto por el Proyecto de Norma Europea prEN 13474 Vidrio para la edificación. Parte 1: Base general de cálculo que recoge la Norma Alemana *Technisque Reglen für die Verwendung von linierförmig gelagerten Verglasungen (Septiembre 1998). [Especificaciones técnicas para la utilización de acristalamientos de apoyo lineal]*.

Tabla 35
Cálculo detallado de presiones isocoras

DETERMINACIÓN DE PRESIONES ISÓCORAS EN LAS U.V.A. SEGUN prEN 13474-1.

NOMENCLATURAS

$P_{C;o}$: Presión isócora climática.
$P_{H;o}$: Presión isócora por altitud.
P_P : Presión meteorológica en el momento de sellado de la U.V.A.
P : Presión meteorológica en el del lugar de utilización.

H_P: Altitud del lugar de fabricación.
H: Altitud del lugar de utilización.

T_P: Temperatura del lugar de fabricación en el momento del sellado.
T: Temperatura del lugar de utilización.

C_H: Disminución de la presión atmosférica con la altitud **0'012 kN/m²·m.**
C_C: Aumento de la presión isócora con la altitud **0'34 kN/m²K.**

F O R M U L A C I Ó N

$$P_{H;0} = 0'012 \times (H - H_P)$$

$$P_{C;0} = 0'35 \times (T - T_P) - (P - P_P)$$

E J E M P L O

Para una U.V.A. fabricada a H_P: 100 m, a una presión de P_P: 960 mlbar y una temperatura de T_P: 16ºC, y colocado en una torre de 250 m de altura, en Madrid (H: 660m), en condiciones de verano con temperatura en Madrid de T: 35ºC y presión barométrica de P: 980 mlbar.

$$P_{H;0} = 0'012 \times [(660+250) - 100] = 9'7 \ kN/m^2$$

$$P_{C;0} = 0'35 \times (35 - 16) - (99'96 - 97'92) = 4'6 \ kN/m^2$$

Estas presiones representan, en circunstancias, extremas como las presentadas, acciones superiores a cualquier carga de viento habitual.

PRESIONES ISÓCORAS

Condición [1]	Parámetros para el lugar de utilización		Parámetros para fabricación (sellado final)		Presión isocora $p_{C;0}$ kN/m²
	Temperatura ºC	Presión meteorológica [2] Kn/m²	Temperatura ºC	Presión meteorológica [2] kN/m²	
Verano	+ 45	100	+ 18	103	+ 12,0
Invierno	+ 3	104	+ 30	980	- 15,0

Nota 1: Las condiciones estivales e invernales se describen en 5.3.3.3
Nota 2: 100 kN/m² = 1000 hPa (= 1000 bar)

CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS TIPO

Condición estival:

- Temperatura del aire exterior e interior + 30 ºC
- Radiación solar 800 W/m², ángulo de incidencia 30º
- Absorción del acristalamiento 35%
- Coeficiente de trasmisión térmica interior 8 W/m²·K
- Coeficiente de trasmisión térmica exterior 13 W/m²·K
- Presión meteorológica intermedia.

Condición invernal:

- Temperatura del aire exterior - 10 ºC
- Temperatura del aire interior + 18 ºC
- Coeficiente de trasmisión térmica interior 8 W/m²·K
- Coeficiente de trasmisión térmica exterior 25 W/m²·K
- Presión meteorológica alta.

Fig. 56. Método Simplificado del prEN.13474. Parte 1.

5. Proyectos

5.1. Edificio Ederra

No creo que una relación nominal de acristalamientos o edificios sirva de excesiva ayuda de manera que, como construcción *Ecoeficiente* en su época y a riesgo de ser tratado de *anacrónico* por los, tan abundantes, amantes de *la última*, no puedo olvidar el Edificio EDERRA, en el Polígono A.Z.C.A. de Madrid, sede en su día de Cristalería Española, S.A., cuyos datos generales adjunto así como una significativa imagen.



Fig. 57. Edificio EDERRA. A.Z.C.A. Madrid, 1976.

Datos principales:

- Fecha de terminación ≈ 1976.
- Altura 16 plantas con distribución original de Planta Libre, sin particiones, y núcleo central de comunicación.
- Acristalamiento, doble piel con cámara de ≈ 300mm ventilada al interior, con persianas térmicas y vidrios monolíticos templados, el exterior de 12mm incoloro y el interior de 10mm color gris, en zonas transparentes, y colectores solares en antepechos realizados con placas metálicas conformadas y vidrio templado de 4mm, en fachadas S, E y W. Proporción entre zona transparente y opaca, 50%.
- Desarrollo de Ingeniería del sistema por el Grupo de Energía Solar de Cristalería Española, S.A.
- El funcionamiento del edificio, básicamente, se apoyaba en la captación de energía solar, a través de los colectores de fachada, para disiparla en cubierta, en momentos de alta temperatura exterior, o aprovecharla mediante bombas de calor en el calentamiento del edificio, en momentos de frío. Con intención no se mencionan período estival ni invernal pues el sistema podía suministrar calor o frío simultáneamente en diferentes puntos del edificio, según la orientación y la intensidad de la radiación solar.
- El sistema se equilibraba mediante un depósito de agua de gran capacidad en el sótano del edificio que acumulaba energía en forma de agua caliente cuando era necesario.
- En su fachada se empleaba de forma inteligente la capacidad de almacenar calor del vidrio de color en masa (gris de 10mm) que, colocado en el interior, era fuente de calefacción gratuita mediante un sencillo sistema de persianas intermedias.

Frustrada la intención de sus creadores de convertirlo en un laboratorio activo de experimentación para el aprovechamiento de la energía solar, alterado su esquema de acondicionamiento térmico general con muchas variaciones que pueden calificarse de cualquier cosa menos mejoras; entre ellas, la eliminación desde el origen del criterio de distribución interior como oficina abierta, en el que se apoyaba su aclimatación interior; sigue siendo, a mi entender, un prototipo malogrado de los primeros tiempos de construcción de edificios para uso terciario con fachada totalmente acristalada que merece una revisión positiva con el empleo de las actuales tecnologías (Informática y Robótica), que en su fecha de construcción aún pertenecían al mundo onírico.

5.2. Edificio Aulario Polivalente en el campus de la U.C.L.M. Cuenca, 2010.

En el otro extremo se encuentra el edificio AULARIO POLIVALENTE del campus de la Universidad de Castilla la Mancha, U.C.L.M., en Cuenca, construido en 2010 por el arquitecto Emilio Verástegui.

El acristalamiento de su vestíbulo central, de cuatro plantas de altura, con vidrios activos de cámara de agua también está, como el EDERRA estuvo, en el principio de algo que el tiempo dirá hasta dónde llevará a nuestros acristalamientos.

El sistema, como ya hemos descrito en el apartado 3, se apoya en un acristalamiento de vidrios incoloros, con cámara de agua mediante la cual se regula en cada estación la energía que entra o sale del edificio a través de los vidrios variando su temperatura.

Se puede consultar más información en la siguiente página web: *http://www.intelliglass.es/index.php?option=com_content&view=article&id=118*

Uno de los problemas de las grandes superficies acristaladas situadas en el cerrramiento consiste en la escasa protección que proporcionan frente a variaciones de temperatura o incidencia directa de la radiación solar.

Como solución a todos estos problemas la empresa IntelliGlass ha desarrollado un producto: el panel iThermGlass, con la misma apariencia que un acristalamiento de muro cortina, consta de doble cámara, una de aire para proporcionar aislamiento y otra de agua en circulación que permite filtrar la componente infrarroja del sol y amortiguar los cambios de temperatura exterior. Véase el esquema en las Figuras 59 y 60.

Fig. 58. Muro cortina compuesto por vidrios activos de cámara de agua. Aulario Polivalente en el campus de la U.C.L.M., Cuenca, 2010.

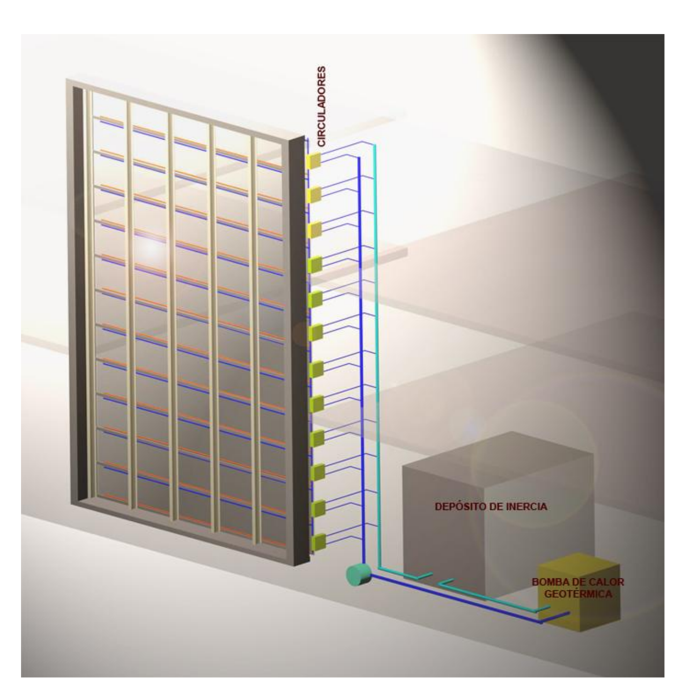


Fig. 59. Esquema de funcionamiento de los vidrios activos de cámara de agua en el muro cortina del Aulario. Cuenca, 2010. Figura extraída de: *http://www.intelliglass.es/index.php?option=com_content&view=article&id=118*



Fig. 60. Detalle de los circuladores que aparecen en la Fig. 59 en el muro cortina del Aulario Polivalente en Cuenca, 2010. Figura extraída de: *http://www.intelliglass.es/index.php?option=com_content&view=article&id=118*

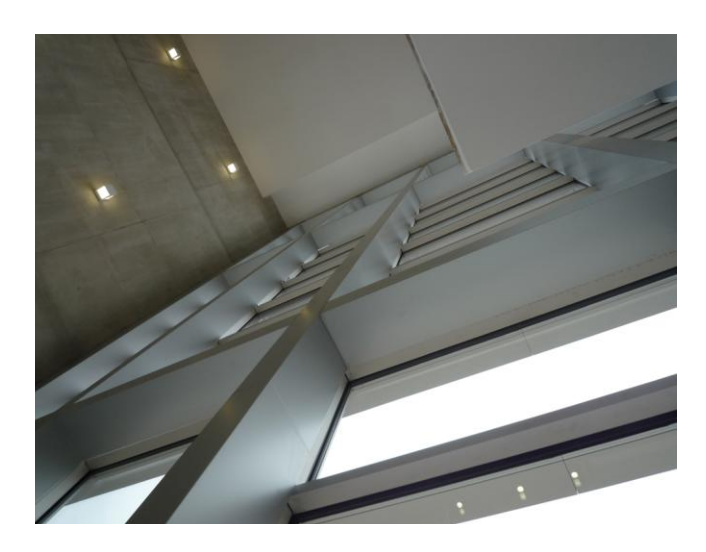


Fig. 61. Imagen interior del muro cortina de vidrios activos de cámara de agua desde el interior del vestíbulo del edificio. Figura extraída de: *http://www.intelliglass.es/index.php?option=com_content&view=article&id=118*

6. Conclusiones

No hemos cerrado el camino pues empieza aquí, estas cortas y apresuradas páginas no buscan ser un *recetario* de soluciones para problemas concretos, pues no estamos frente a una función matemática con un campo de existencia perfectamente acotado y conocido, sino una guía de advertencias para el mejor uso posible del vidrio.

Desde que el vidrio, ese líquido de viscosidad infinita, comenzó a evolucionar para responder a las demandas que desde la fachada se plantearon por el incremento de superficie ocupada por él, cada vez mayor, han pasado no más de sesenta o setenta años. Es por tanto un material viejo, por origen, y joven por evolución y en todos los materiales de evolución rápida, y la del vidrio lo ha sido, se produce involuntariamente el espejismo de la *omnipotencia*, para todo vale y en todos los lugares.

Un material inerte, con propiedades físicas fijas, no puede satisfacer por sí solo a necesidades variables y dependientes de condiciones climatológicas, y cambios puntuales de corta duración dentro de la misma estación. No existe un diseño único y válido para el cerramiento de un igloo en el Ártico y para la tienda del desierto creo que el entorno ha impuesto siempre la forma constructiva y el *talón de Aquiles* del Movimiento Moderno fue la creencia en el *Estilo Internacional*. El mejor servicio que se puede hacer a la llamada *Ecoeficiencia* es *diseñar para el lugar* y eso no se hace sólo con el vidrio.

No existen buenos o malos materiales sino buenas o malas aplicaciones del material. Con esta premisa a la hora de diseñar un acristalamiento eficiente se deben tener en cuenta los siguientes consejos:

1. El vidrio proporciona fundamentalmente luz y transparencia a nuestras estancias. Por tanto, la superficie de huecos necesarios dependerá de la intensidad de Radiación Solar sobre ellos, Latitud y Orientación Geográfica, que a mayor Latitud mayor superficie deberían tener.
2. En general, latitudes bajas implican clima estival más riguroso y las altas, mayor rigurosidad invernal. En las primeras prima la protección solar, que se beneficia de la menor necesidad de superficie de iluminación; y en las segundas, el aislamiento térmico, perjudicado por la mayor superficie necesaria para iluminación. A esta condición cabe añadir las condiciones específicas de cada tipo de clima en cada Latitud: desértico, mesetario, de montaña, marítimo, etc., que marcará los gradientes relativos de temperatura entre el día y la noche.
3. El vidrio puede dar servicio a múltiples demandas por su variedad de tipos que se han descrito en las páginas de este Capítulo: Protección Solar con vidrios absorbentes y de capa, pirolítica o magnetrónica y Aislamiento Térmico en régimen frío con las Unidades de Vidrio Aislante (U.V.A.) de cámara de baja convección y el refuerzo de los vidrios de capa de Baja Emisividad, también pirolíticos o magnetrónicos. Incluso existen líneas de investigación en desarrollo bastante avanzado sobre vidrios de cámara *activos*, que empleando agua en ella como caloportador pueden reaccionar variando las rígidas propiedades físicas del vidrio de acuerdo a las condiciones climatológicas exteriores.
4. A esas prestaciones que cubren casi todo el campo de las demandas térmicas se unen algunos inconvenientes que no debemos olvidar y que relacionamos esquemáticamente a continuación:

    4.1. La manipulación del vidrio para obtener con él mayor Protección Solar tanto en vidrios absorbentes como de capa incrementa, algunas veces de forma notable, su Absorción Energética, lo que producirá mayor calentamiento y por consiguiente, mayor radiación del vidrio, como emisor, hacia la zona más fría.

    4.2. Los vidrios de Baja Emisividad, diseñados para evitar, en temporadas frías, la perdida por radiación del calor acumulado por el vidrio pueden convertirse en *ratoneras de calor* en temporadas cálidas calefactando el interior de una estancia en julio y en Almería o Málaga, por ejemplo ¡!

    4.3. La exposición de vidrios con Absorción Energética (AE) media o alta y/o tratamiento de Baja Emisividad (Low ε) a obstrucciones parciales, toldos, voladizos, cortinas interiores o, incluso, su colocación en carpinterías que permitan la superposición parcial de sus hojas puede inducir riesgos de roturas térmicas, tanto más graves cuanto mayor sea la (AE) y/o menor la Emisividad (ε).

5. Generalmente no existen *vidrios iguales para todos los climas*, pero sí existen acristalamientos *adecuados para cada clima* y en su diseño se debe considerar que, como decíamos en su apartado correspondiente, generalmente es *más económico producir calor que eliminarlo* luego en la decisión siempre un término dominará sobre el otro Protección Solar versus Aislamiento Térmico y según la climatología general dominante y las condiciones puntuales del tipo de clima, tendremos que decidir quién es *Scylla* y quién, *Carybdis*, para mover correctamente el timón del diseño.
6. En gran parte de los casos es útil acogernos a las recomendaciones de mínimos de las Normas (C.T.E.) pues *mejorar* las prestaciones de Factor Solar (g), aumentándolo, o Emisividad (ε), disminuyéndola pueden llevarnos a despreciar la calefacción natural del Sol o a la *ratonera de calor* ya mencionada. Ya sabemos… *lo mejor es enemigo de lo bueno*.

Glosario

Acristalamiento Compuesto: todo aquel formado por vidrios simples monolíticos en cualquiera de sus composiciones, laminados, con cámara etc.
Anisotropía: característica física que asociada a la birrefringencia, bajo la acción de cargas, altera la transmisión luminosa según la dirección de la luz haciendo aparecer marcas de diferente tonalidad, fundamentalmente en los vidrios templados. También puede manifestarse en vidrios recocidos, sin templar, bajo la acción de cargas y bajo luz polarizada, fenómeno que cesa al desaparecer la carga.
Balance Energético: sumatorio de ganancias y perdidas energéticas, a través de los cerramientos, debidas a la climatología y función de su mayor o menor capacidad de aislamiento y protección solar cuyo resultado determina la cantidad de energía a aportar para mantener un nivel de confort en nuestras estancias.
Factor Solar: en un vidrio sometido a radiación solar es el sumatorio de la energía transmitida directamente más la absorbida y reenviada al interior por el vidrio.
Latitud: altura, en grados sobre el Ecuador, de un punto de la superficie terráquea.
Microfisura: grieta semieliptica microscópica que se encuentra en las caras externas del vidrio.
Presión Isócora: la debida a transformaciones a igualdad de volumen del fluido de la cámara de una Unidad de Vidrio Aislante (U.V.A.).
Ratonera de calor: donde se entra y no se puede salir, en el caso del vidrio la propiedad que permite a la energía atravesar al vidrio en longitud de onda corta, ≤ 2400nm, e impide su salida en longitud de onda larga ≥ 3000nm.
Rula: en términos vidrieros, disco pequeño con el que se traza el vidrio produciendo una línea regular de fractura recta. Pueden ser manuales, para cortes artesanales o pequeñas dimensiones, o mecánicas montadas sobre cabezales de corte automático industrial.
U.V.A.: definición dada por nuestra Normativa al acristalamiento compuesto por dos o más vidrios, monolíticos o laminados, con capas o incoloros, con una o más cámaras de aire, o gas, y sellado en todo su perímetro. Las siglas corresponden a la definición Unidad de Vidrio Aislante.
Vidrio Absorbente: vidrio que absorbe más energía solar que el habitual incoloro. Corresponde con vidrios de color en masa y algunos de capa.
Vidrio Autocalefactor: aquel vidrio de capa o laminado con conductores metálicos de muy pequeña sección en su intercalarlo (PVB) que, conectado a la corriente eléctrica, se calienta. Se desarrolló para zonas de temperaturas muy bajas y para usos especiales, maquinarias, barcos, trenes, con destino a zonas árticas o antárticas para evitar condensaciones que dificultaban la visión. En la actualidad se comercializan también para viviendas en zonas frías o como radiadores transparentes según reza la publicidad.
Vidrio de Baja Emisividad: el que mediante la aplicación de una capa metálica, en una de sus caras, reduce las pérdidas por radiación, a través de ella, del calor acumulado en su masa.
Vidrio de Cámara Activo: aquel vidrio de cámara cuyo fluido de la cámara puede variar sus propiedades de forma controlada, fundamentalmente la temperatura, según cambien las condiciones climatológicas.
Vidrio de Capa Magnetrónica: aquel vidrio sobre una de cuyas caras se deposita una capa metálica de mínimo espesor (nm) aplicada en frío en atmósfera de alto vacío para mejorar sus propiedades naturales en el campo de la protección térmica, ya sea frente a la radiación solar o el aislamiento térmico.
Vidrio de Color en Masa (V.C.M.): vidrio en cuya composición se añaden elementos que aportan color con el fin de aumentar su absorción. Tradicionalmente son verdes, grises o bronces, y en menor medida, azules.
Vidrio con capas (V.C.): vidrio al que se trata una de sus caras para mejorar algunas de sus propiedades energéticas. Pueden fabricarse en frío (magnetrónicos) o en caliente (pirolíticos).
Vidrio Electrocrómico: el que altera sus propiedades de transparencia o color con el paso de energía eléctrica.
Vidrio Fotocrómico: el que altera asimismo sus propiedades frente a la exposición luminosa.
Vidrio Fotovoltaico: vidrio que puede producir energía eléctrica, bajo la acción de la radiación solar. No debe confundirse con los paneles de vidrio fotovoltaicos en los que el vidrio sólo cumple la función de envolver y proteger a las células fotovoltaicas que son las encargadas de generar la energía.
Vidrio Laminado: acristalamiento compuesto formado por varios vidrios adheridos entre sí mediante láminas generalmente plásticas (PVB, POM, PMMA) o ciertos tipos de resinas epoxídicas y siliconas. Su aspecto es de un vidrio monolítico.
Vidrio Monolítico: el vidrio simple según sale de la línea de fabricación.
Vidrio Pirolítico: vidrio de capa fabricado en caliente, a la salida de la extendería, a unos 600 ºC por deposición de sílice o metales que se fijan a la superficie vítrea por la acción del calor.
Vidrio Reflectante: coloquialmente se han definido así a los vidrios de Control Solar que, en sus orígenes, también tenían una altísima reflexión luminosa (efecto espejo).
Vidrio Termocrómico: vidrio que altera sus propiedades por la acción del calor.
Termoendurecido o Temple Corto: templado térmico en el que se calienta el vidrio a menor temperatura que para un temple normal y se enfría más despacio acumulando así menores tensiones. Es menos resistente que el templado normal y se rompe con fragmentación menor, en trozos peligrosos. Se emplea, pues existe la opinión de que tiene menor deformación durante el proceso.
Transmitancia Térmica (U): según se define en el C.T.E. (normativa vigente en España) es el flujo de calor, en régimen estacionario, dividido por el área y por la diferencia de temperaturas de los medios situados a cada lado del elemento que se considera.

Tratamiento Recocido: tratamiento que recibe el vidrio, en la última fase de fabricación, para eliminar por enfriamiento controlado, en la llamada arca de recocido, las posibles tensiones generadas por diferencial térmico local.
Tratamiento Templado Térmicamente: tratamiento al que se somete al vidrio para mejorar su resistencia mediante un calentamiento uniforme hasta 650-680 ºC y un enfriamiento rápido, en 15 ó 20s con aire frío. El proceso genera tensiones muy altas de compresión en las caras externas y tracción en el interior; puede decirse que son las antípodas del recocido.
Tronce: tras la marca con la rula de corte en la cara superior de una hoja de vidrio, este proceso produce su fractura total por flexión concentrada en dicha marca. En lenguaje coloquial puede definirse como "tronchar al vidrio".

Bibliografía

[1] J. M. Fernández Navarro. *El Vidrio*. Textos Universitarios Nº 6. C.S.I.C. y S.E.C.V. Tercera Edición, Madrid, 2003.
[2] J. Barton y C. Guillemet. *Le Verre*. Science et technologie. EDP SCIENCES. France, 2005.
[3] J. A. Coto. *Materiales de construcción.* Vol. 41. Nº 221. Enero/ Febrero/ Marzo. Madrid, 1991.
[4] Inglis, C.E. *Stresses in a plate due to messure of craks and sharp corners.* Trans. Inst. Naval Arch. 55. 1913.
[5] Charles, R.J.; Hulling, W.B. *The kinetics of glass failure by stress corrosion. Sympos sur la resistance mecanique du verre et les moyens de l'ameliorer*. Florencia 1961, 511-527, Edit. Union Scient. Continent. Du Verre. Charleroi, 1962.
[6] Olivier Gaume. Ingenieur a Recherche á Saint-Gobain Recherche. *Découpe a verre plat* (BM 7 428-5).
[7] The Institution of Structural Engineers. *Structural use of glass in buildings.* 1999.
[8] Proyecto de Norma Europea prEN 13474. *Vidrio para Edificación*. (Parte 1: Diseño de los Acristalamientos; y Parte 2: Cálculo de Cargas Uniformemente Repartidas).

Consulta de Nuevos Materiales

(A) Acristalamientos activos con cámara de agua. IntelliGlass. www.*intelliglass*.es
(B) Vidrios de capa fotovoltaicos. Transparentes o translúcidos. Soliker / Uni Solar. *www.soliker.es*

Eficiencia energética de edificios
Energy Performance of Buildings

Servando Alvarez Domínguez [a*] , Rafael Salmeron Lissén [b]

[a] *Dr. Ingeniero Industrial, Catedrático.* [b] *Dr. Arquitecto. Departamento de Ingeniería Energética. Universidad de Sevilla.*

Resumen

La necesidad de la certificación energética de edificios de nueva planta (RD 47/2007) [1] ha supuesto importantes esfuerzos para los estudios de arquitectura. En auge entre arquitectos, constructores y promotores, ya que el Estado fomenta esta medida mediante el incentivo de edificios de alta calificación energética y los concursos de arquitectura valoran este aspecto en el diseño. Pero hasta ahora, la mejora energética de los edificios era un proceso casi de "ensayo y error". Con este documento se busca poder dar al proyectista una idea clara de las bases de la energética edificatoria y sus fundamentos para que lo orienten respecto al comportamiento energético de la forma del edificio, sus soluciones constructivas y los sistemas que posee, así como mostrarle el modo de mejorarlo en busca de una alta eficiencia energética. Teniendo en cuenta este escenario, se plantea definir una metodología de utilidad para la optimización energética de los edificios, incluso para las primeras etapas del diseño arquitectónico, mediante el uso del álgebra interna, empleada posteriormente en el Documento Reconocido para la Calificación Energética Simplificada de Viviendas.

Palabras Clave: Eficiencia Energética, Alta Calificación Energética, Edificios de viviendas, Arquitectura Sostenible

Abstract

The energy certification of new buildings (RD 47/2007) [1] has meant significant efforts to architectural firms. At the very peak among architects, builders and developers, since the State encourages this measure by means of the incentive of high energy rating buildings and architectural competitions value this aspect in the design. However, buildings energy performance improvement is often almost a process of 'trial and error'. The method described in this document aims to convey a clear idea about the energy performance of buildings; and to provide the designer with a screening tool to improve it so that he/she could design in a framework considering energy performance of buildings by means of their geometry, constructive solutions and systems; as well as to show him how to improve buildings energy performance in search of high energy efficiency. Considering this scenario, we propose to define a useful methodology for buildings energy optimization, even for the early stages of architectural design by means of using the methods used in the official document called 'Simplified Methodology for Energy Rating of New Housing'.

Keywords: Energy efficiency, Energy Rating System, Low Energy Buildings, Sustainable Architecture

1. Introducción

1.1. Marco Técnico y Legislativo

Para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO_2 en la Unión Europea (UE), el Parlamento Europeo se dotó en 2002 de varios instrumentos, uno de los cuales fue la Directiva 2002/91/CE [2] relativa a la eficiencia energética de los edificios.

En el espíritu de esta directiva subyace la necesidad de acometer tres grupos de medidas con carácter simultáneo:

- El endurecimiento progresivo de la reglamentación sobre calidad térmica de los edificios de nueva planta. Son los llamados requisitos mínimos.
- La promoción de edificios de nueva planta cuyo consumo de energía sea netamente inferior al que se deriva de la aplicación estricta de la reglamentación.
- En el sector de los edificios existentes se trata de identificar, para cada edificio, una relación de medidas de mejora que, dentro de un contexto de viabilidad técnica y económica, supongan una mejora significativa de la eficiencia de dicho edificio.

* salvarez@us.es , rsalmeron@samler.es

Citar como: Álvarez Domínguez, S., Salmerón Lissén, R. (2012). Eficiencia energética en edificios. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 184 – 206). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

La normativa en materia energética se convirtió en el gran instrumento para la implementación de políticas energéticas y el cumplimiento de los compromisos internacionales.

No obstante, por un lado, esta directiva no ha cumplido con las expectativas creadas y por otro, nos encontramos con un nuevo contexto energético y medioambiental más exigente que nos habla de:

- Aumentar la eficiencia energética para alcanzar el objetivo de reducir el consumo energético en la Unión Europea en un 20% para 2020.
- Reducir, para 2020, las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un 20% como mínimo con respecto a los niveles de 1990.
- Fomentar el uso de energía procedente de fuentes renovables con el objetivo vinculante de que la energía procedente de fuentes renovables represente el 20% del consumo de energía total de la Unión Europea para 2020.

En consecuencia, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea deciden que "debiéndose llevar a cabo modificaciones sustantivas, conviene, en aras de una mayor claridad, proceder a la refundición de dicha Directiva que pasa a denominarse Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición) [3].

1.2. Resumen de la situación de la normativa energética en España de acuerdo con la Directiva 2002/91/CE

Los diferentes objetivos de la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (DEEE) se han transpuesto fundamentalmente mediante Decretos Ley, quedando el correspondiente a la certificación de Edificios existentes previsto para el año 2011. Véase el esquema correspondiente a la Figura 1.

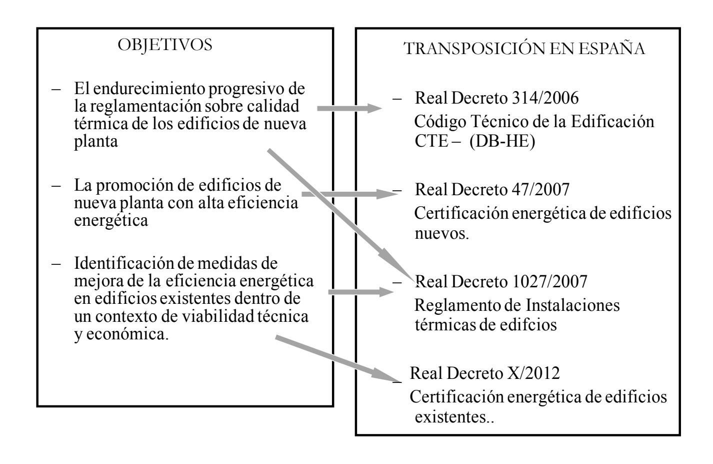


Fig. 1. Esquema general de la transposición de la DEEE.

1.3. Estructura de los aspectos energéticos en el Código Técnico de la Edificación (DB-HE)

Los aspectos energéticos del Código Técnico de la Edificación (sección de ahorro de energía) [4], normativa vigente en España, se encuadran en cinco documentos básicos. A diferencia de la mayoría de los países de la UE, puede comprobarse que en España no existe una exigencia global en consumo energético o en emisiones (el denotado nivel 0) ni siquiera una exigencia para los usos de la energía. Los documentos básicos lo que contienen son exigencias indirectas relativas a la limitación de demanda, la mejora del rendimiento o de empleo de energías renovables, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 2, en la que se puede observar cómo las prescripciones de nivel 2 se corresponden fielmente con el contenido de los documentos básicos.

Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	CTE
Consumo Total	Calefacción	Demanda	HE1
		Rendimiento	HE2
	Refrigeración	Demanda	HE1
		Rendimiento	HE2
	Agua Caliente Sanitaria	Cont. Solar	HE4
		Rendimiento	HE2
	Iluminación	Cont. solar	HE5
		Rendimiento	HE3
	Uso general electricidad	Cont. Solar	HE5

Fig. 2. Jerarquía de prescripciones en el CTE-DB-HE.

Cada uno de los aspectos anteriores incluye una toma de decisiones a cuatro niveles diferenciados:

- La cuantificación de las exigencias.
- Su materialización formal.
- Los procedimientos de verificación.

A título de ejemplo de lo anterior, las exigencias vinculadas a la limitación de la demanda, contenidas en el Documento Básico Ahorro de Energía DB-HE1 se basan en conseguir un ahorro medio del 25% frente a la situación reglamentaria anterior (NBE-CT 79). Las exigencias se materializan con un procedimiento relativo en el que el edificio a construir se compara con un edificio de referencia con unas calidades constructivas de referencia que dependen del clima y del uso del edificio.

Finalmente, la comparación se hace directamente, comparando las calidades constructivas (la denominada vía prescriptiva o simplificada) o indirectamente, mediante un procedimiento informático denominado LIDER o cualquier otro procedimiento reconocido (la denominada vía prestacional o general). Ambas vías se ilustran en la Fig. 3.



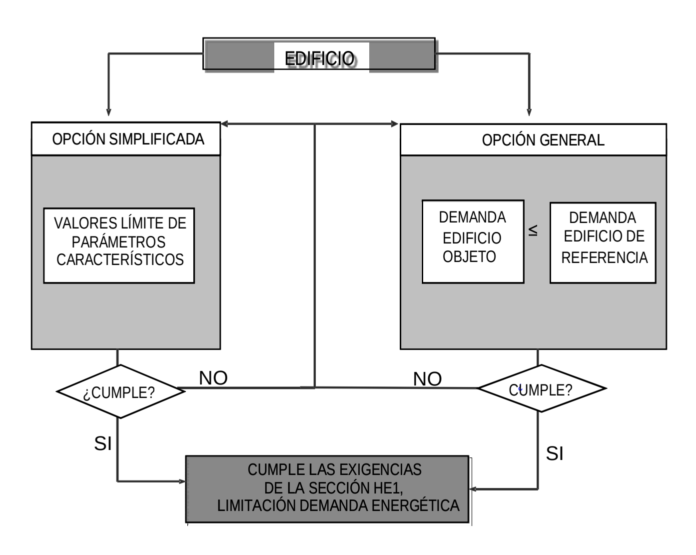
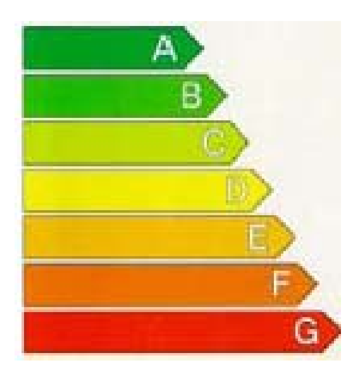


Fig. 3. Opciones de cumplimentación del CTE DB-HE1.



Clase A	si	$IEE_G < 0.37$
Clase B	si	$0.37 < IEE_G < 0.60$
Clase C	si	$0.60 < IEE_G < 0.93$
Clase D	si	$0.93 < IEE_G < 1.43$
Clase E	si	$1.43 < IEE_G$

Fig. 4. Relación entre Indicador de eficiencia energética y las clases de eficiencia en un caso concreto: viviendas unifamiliares en Madrid.

1.4. Estructura de la certificación energética de edificios

Una vez que el edificio ha cumplido con las exigencias del Código Técnico, se debe proceder a su certificación energética. Como se indica en la DEEE, uno de los objetivos del certificado de eficiencia energética de un edificio es que el consumidor pueda comparar y evaluar la eficiencia energética de un edificio determinado frente a otros. Puesto que cumplir con el CTE-DB-HE1 - sólo garantiza unos mínimos de calidad energética, es obvio que habrá edificios que se limiten a satisfacer esos mínimos mientras que habrá otros que presenten niveles muy superiores.

La elaboración del esquema de certificación ha requerido la toma de decisiones a tres niveles:

1. Qué se compara (Indicadores de comportamiento).
2. Cómo se materializa la comparación (Escala de calificación).
3. Qué procedimientos se utilizan para obtener los indicadores que permiten comparar los edificios.

En España se comparan muchas cosas (Indicadores intermedios) aunque el Indicador definitivo son las emisiones globales de CO_2 por m² y año.

La comparación se materializa con la ya clásica escala de 7 letras (A hasta G) que se denominan clases de eficiencia energética. Para entrar en esta escala hay que calcular los denominados Indicadores de eficiencia energética. En síntesis, un Indicador de eficiencia energética es el ratio entre el Indicador de comportamiento energético correspondiente al edificio objeto y un valor de referencia consistente.

A título de ejemplo, se muestra a continuación la relación entre Indicador de eficiencia energética y las clases de eficiencia para un caso concreto (Fig. 4), por ejemplo, viviendas unifamiliares situadas en Madrid.

Puede comprobarse de la tabla de asignación de clases cómo la referencia (IEEG =1) se encuentra en la clase de eficiencia D y cómo por ejemplo, para obtener la clase de eficiencia A el edificio objeto debe tener unas emisiones de CO_2 un 63% (100-37) inferiores a las de referencia.

Desde el punto de vista de las autoridades que elaboran las políticas energéticas, el objetivo del certificado es promover edificios mucho mejores energéticamente que los que se derivarían del cumplimiento estricto del CTE_DB_HE para lo que se han arbitrado subvenciones (normalmente en forma de ratio de euros según la superficie (€/m²) para aquellos edificios que alcanzan alta clasificación energética (clases de eficiencia A y B).

En cuanto a los procedimientos que se utilizan para obtener los Indicadores de eficiencia energética, CALENER es la herramienta oficial y, en principio, se utilizará en todos los casos para los que se haya utilizado previamente LIDER (Fig. 5).

Para los edificios que hayan optado por la opción prescriptiva existe la posibilidad de obtener también el certificado energético por una vía prescriptiva aplicable a edificios de viviendas. Para cada zona climática hay una serie de soluciones técnicas y en síntesis su filosofía viene a decir que: “los edificios de viviendas que se limitan a cumplir los requisitos del Código Técnico y no demuestran ningún otro aspecto relativo a sus prestaciones energéticas tienen por defecto la clase E, con la excepción de aquellos que están incluidos en alguna de las soluciones técnicas a los que se les asigna la clase D”.

Se puede fácilmente concluir que las dos vías que se han desarrollado hasta el presente están muy alejadas entre sí, tanto por complejidad de aplicación como por la calidad que se le permite a los edificios que opten por ellas, por lo que se han desarrollado opciones simplificadas intermedias.

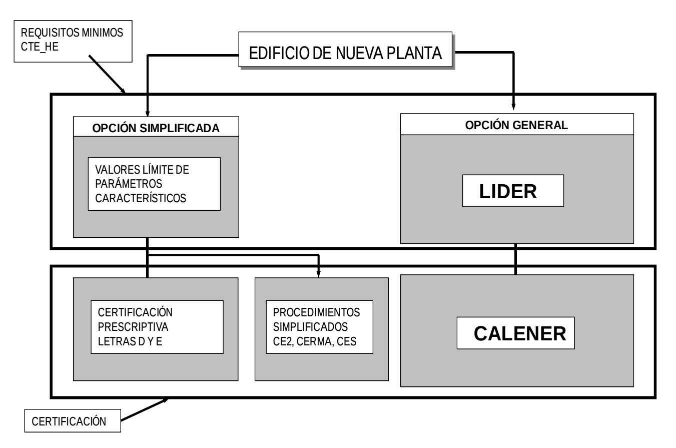


Fig. 5. Relación entre procedimientos de verificación del Código Técnico y procedimientos de certificación.

1.5. Algunos Elementos Significativos de la Directiva 2010/31/UE (Refundición)

Entre las modificaciones de la Directiva 2010/31/UE frente a su edición precedente mencionaremos las siguientes:

- Requisitos mínimos: los Estados miembros tomarán las medidas necesarias para garantizar que se establezcan unos requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios o unidades de éste con el fin de alcanzar niveles óptimos de rentabilidad.
- Planes nacionales destinados a aumentar el número de edificios de consumo de energía casi nulo: los Estados miembros se asegurarán de que:
  - A más tardar, el 31 de diciembre de 2020, todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo.
  - Después del 31 de diciembre de 2018, los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas sean edificios de consumo de energía casi nulo.

1.6. Actualización del CTE-HE

Al haber transcurrido 5 años desde su publicación se hace necesario una revisión de los requisitos mínimos contenidos en el Documento Básico de Ahorro de Energía CTE-DB-HE. Esta revisión ha tenido en cuenta, entre otros, los aspectos de la directiva citados en la sección anterior.

Se describen a continuación algunas de las modificaciones más significativas:

1.6.1. Nuevas Exigencias

Las nuevas exigencias de demanda de calefacción se han fijado para alcanzar niveles óptimos de rentabilidad, tal como establece la Directiva 2010/31/UE. Estos niveles óptimos implican el cálculo del coste (valor actual neto) de las medidas de eficiencia energética durante el ciclo de vida útil previsto aplicados a los edificios de referencia y aplicando los principios del marco metodológico comparativo que está disponible desde junio de 2011. Se han realizado estudios sobre 23 edificios (9 viviendas unifamiliares y 14 bloques) en 12 localidades.

Para cada edificio en cada localidad se realiza un estudio de medidas de mejora de la envuelta partiendo de una envuelta inicial que cumple estrictamente el CTE-HE 2006.

De dicho estudio se obtiene la opción de menor coste de ciclo de vida. Comparando la demanda energética asociada a dicha opción con la demanda inicial se obtiene el ahorro. A este ahorro se le denomina ahorro en el óptimo.

En la Figura 6 se representa un ejemplo de obtención del nivel óptimo de rentabilidad para una vivienda unifamiliar en Madrid y el ahorro frente a la situación del CTE-DB-HE 2006.

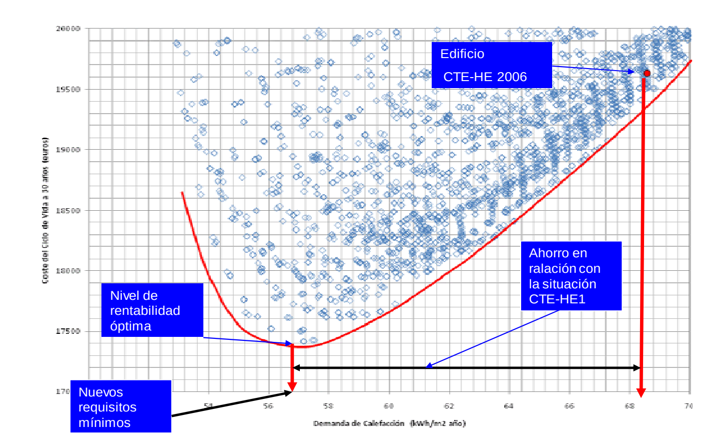


Fig. 6. Coste del ciclo de vida (ordenadas) frente a demanda de calefacción.

Las conclusiones derivadas de los estudios han sido las siguientes:

Aunque el resultado obtenido depende de las hipótesis de partida utilizadas para obtener el coste de ciclo de vida (LCC), los estudios de sensibilidad realizados permiten concluir que no hay variaciones significativas del resultado cuando se producen desviaciones lógicas con respecto a un valor medio de las variables citadas. Este valor medio es 30 años de vida útil, 2.5% de interés del dinero y 3.5% anual de incremento del precio de la energía.

Un aspecto clave de la búsqueda del ahorro en el óptimo es el catálogo empleado en su obtención, es decir, el conjunto de medidas de mejora exploradas y el nivel de cada una de ellas. Se ha trabajado con tres catálogos:

1. Catálogo base: aumento de aislamiento de cerramientos opacos, mejora calidad de huecos y mejora de puentes térmicos, excepto los de contorno de huecos.
2. Catálogo ampliado: el catálogo base más mejora de puentes térmicos de contorno de huecos, mejora de estanqueidad de opacos y caudal variable de ventilación.

3. Catálogo reducido: sólo aumento de aislamiento de cerramientos opacos y mejora calidad de huecos, es decir, el mismo catálogo utilizado en la CTE-HE 2006.

Los ahorros en el óptimo son extraordinariamente dependientes del edificio y del clima. En la Figura 7 se muestran para 12 localidades cuyo clima está representado por la severidad climática de invierno (SCI), los ahorros en el óptimo para los 23 edificios de viviendas. Se comprueba cómo, por ejemplo, para la localidad utilizada con clima más suave (Málaga) los ahorros están entre el 40 y el 78%, mientras que para la más severa (Burgos) oscilan entre el 19 y el 36%.

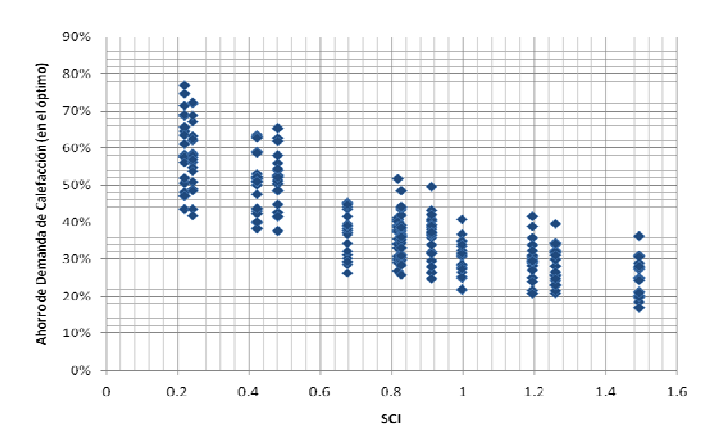


Fig. 7. Ahorros en el nivel óptimo de rentabilidad.

Los criterios finales de los estudios sobre niveles óptimos de rentabilidad para obtener los ahorros exigibles en demanda de calefacción han sido:

- Los cálculos de coste de ciclo de vida se harán con valores medios de escenarios económicos, del número de años del ciclo de vida y sin inclusión de las emisiones de CO_2 evitadas.
- Los ahorros exigibles se obtendrán con el catálogo reducido.
- Los ahorros se fijarán para que un porcentaje significativo de los edificios, fijado en principio en el 80%, sea capaz de obtenerlos con el catálogo de componentes reducido. Los restantes edificios deberían recurrir al catálogo base o al ampliado.
- Los ahorros se obtendrán con desplazamientos en el pareto hasta buscar un compromiso aceptable en términos de sobrecoste, periodo de amortización y transmitancias de opacos y huecos.
- Los ahorros exigibles serán únicos para edificios unifamiliares y bloques pero dependerán de la zona climática

El ahorro pivote que determina la nueva exigencia se muestran en la Figura 8.

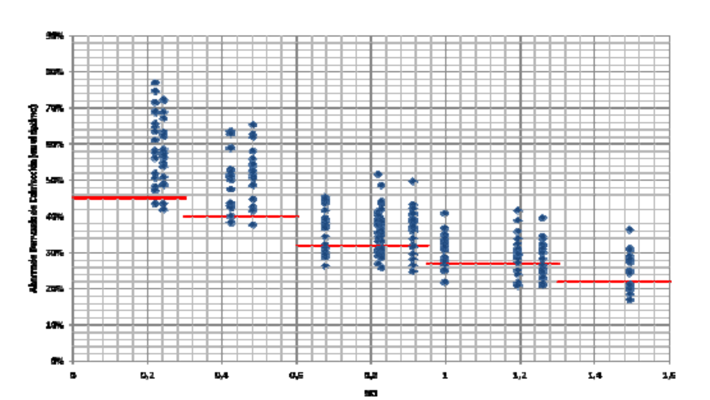


Fig. 8. Redondeo por zonas climáticas de los ahorros exigibles para el CTE-HE 2011 frente a la situación de CTE-HE 2006.

2. Fundamentos de los Edificios de Alta Eficiencia Energética

La obtención de edificios de energía casi nula incluye decisiones a diferentes niveles. Cronológicamente, las decisiones abarcan los siguientes aspectos:

1. Diseño general: ubicación, compacidad, orientación, porcentaje acristalado etc.
2. Calidad constructiva de los elementos convencionales de la envuelta.
3. Elementos especiales de la envuelta y sistemas pasivos.
4. Equipos y sistemas térmicos convencionales.
5. Equipos y sistemas innovadores de alta eficiencia.
6. Incorporación de energías renovables.
7. Sistemas avanzados de gestión y control.

No existe una norma general para saber cuál es la decisión más adecuada en cada etapa puesto que dicha decisión depende, entre otras cosas del tipo de edificio, de su uso y del clima en el que está situado.

2.1. Bases Conceptuales del Procedimiento: el Álgebra de los Indicadores de Eficiencia Energética

En primer lugar, definimos los Indicadores de comportamiento que expresan demandas energéticas, consumos energéticos y/o emisiones de CO_2 por m² de superficie útil de un determinado edificio (el edificio objeto) en una determinada localidad bajo unas condiciones estándar, tanto climáticas como de operación [5].

Un Indicador de comportamiento es, por ejemplo, la demanda energética de calefacción de una determinada vivienda unifamiliar situada en Madrid.

Por su parte, el Indicador de eficiencia energética (IEE) se define como el ratio entre un indicador de comportamiento energético correspondiente al edificio objeto y un valor de referencia consistente.

Para cada uso o servicio energético de un edificio incluido en el proceso de certificación energética (calefacción, refrigeración y ACS en el caso de viviendas)

se definen tres indicadores: el correspondiente a la demanda, el correspondiente al sistema y el correspondiente al uso propiamente dicho.

Por ejemplo, para el uso de calefacción estos indicadores son:

- Indicador de eficiencia energética de demanda de calefacción.

$$IEE_{DC} = \frac{Demanda\ de\ calefaccion\ del\ edificio\ objeto}{Demanda\ de\ calefaccion\ \ de\ referencia}$$

- Indicador de eficiencia energética del sistema de calefacción.

$$IEE_{SC} = \frac{\frac{1}{Rendimiento\ del\ sist.\ de\ calefacción\ del\ edif.\ objeto}}{\frac{1}{Rendimiento\ del\ sist.\ de\ calefacción\ de\ referencia}}$$

- Indicador de eficiencia energética del uso de calefacción (en términos de energía final).

$$IEE_{C} = \frac{Consumo\ de\ calefaccion\ del\ edificio\ objeto}{Consumo\ de\ calefaccion\ \ de\ referencia}$$

Puesto que el consumo puede expresarse como la demanda dividida entre el rendimiento medio estacional del sistema existe una relación entre los tres indicadores anteriores:

$$IEE_{C} = \frac{\frac{Demanda\ de\ calefaccion\ del\ edificio\ objeto}{Rendimiento\ del\ sist.\ de\ calefac.\ del\ edif.\ objeto}}{\frac{Demanda\ de\ calefac.\ de\ referencia}{Rendimiento\ del\ sist.\ de\ calefac.\ de\ referencia}} = IEE_{DC} \cdot IEE_{SC}$$

Para expresar el indicador del uso en términos de energía primaria o de emisiones de CO_2 bastaría con afectar a los rendimientos de los sistemas del coeficiente de paso correspondiente en función del energético utilizado. En lo sucesivo, el indicador que se usará es el de emisiones de CO_2 por ser el que se contempla explícitamente como Indicador global del proceso de calificación.

Como puede verse, cuanto más pequeño es un indicador más eficiente es la opción elegida. Un indicador menor que la unidad indica además que la opción elegida para el edificio objeto es mejor que la de referencia.

Para el conjunto de los usos de una vivienda se obtiene el Indicador global de la misma a partir de los indicadores de cada uno de los usos ponderados por los coeficientes de reparto asociados a dichos usos.

La expresión final es la siguiente [2]:

$$IEE_{G} = IEE_{C} \cdot \varphi_{C} + IEE_{R} \cdot \varphi_{R} + IEE_{ACS} \cdot \varphi_{ACS}$$

Los coeficientes de reparto indican cómo se reparten las emisiones globales de CO_2 de referencia entre los diferentes usos. Están expresados en tanto por uno, dependen fuertemente de la zona climática, y su suma es la unidad.

En el caso de edificios de viviendas, los valores de referencia son los valores medios de la población resultante de suponer que los edificios se construyen siguiendo estrictamente los requisitos y limitaciones que establece el Código Técnico en su sección CTE_DB_HE.

A título de ejemplo, en la Figura 9 se muestra la distribución de la demanda de calefacción para las viviendas unifamiliares en Madrid que cumplen estrictamente las limitaciones del CTE_DB_HE1. Como puede verse, el rango de las demandas de calefacción posibles oscila entre 30 y 100 kWh/m².

El valor medio vale 66,7 kWh/m², por lo que el Indicador de eficiencia energética de demanda de calefacción de cualquier edificio de viviendas unifamiliares situado en Madrid se obtiene dividiendo su demanda de calefacción específica entre 66,7.

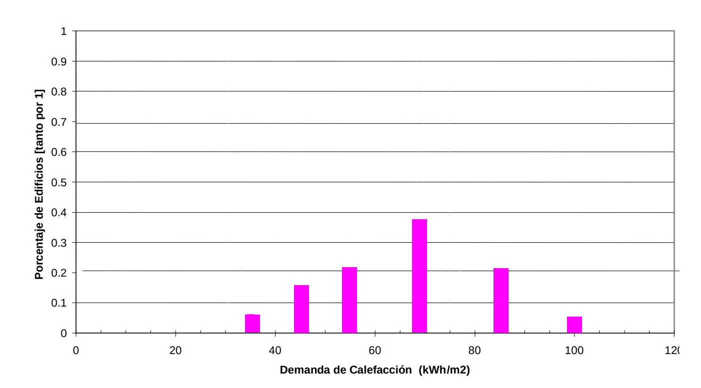


Fig. 9. Distribución de la demanda de calefacción en edificios de viviendas unifamiliares situados en Madrid que cumplen estrictamente con las transmitancias del CTE-DB-HE1.

Con análogo razonamiento se han obtenido los valores de referencia para los consumos y las emisiones de CO_2 en las diferentes localidades [4].

Agrupando las localidades por zonas climáticas se pueden obtener valores de referencia para cada una de ellas.

La Figura 10 muestra los valores de referencia globales de emisiones de CO_2 para las viviendas unifamiliares en las distintas zonas climáticas desglosados en los tres usos.

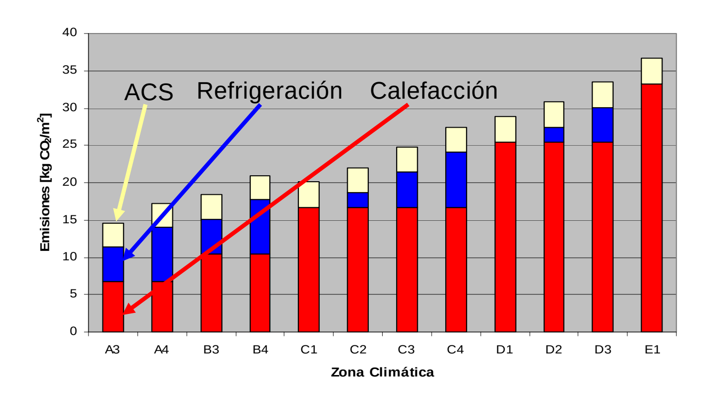


Fig. 10. Valor global y valores por usos de las emisiones de CO_2 de referencia.

Si se normalizan las referencias anteriores se pueden obtener los coeficientes de reparto, cuyo valor se recoge en la Figura 11.

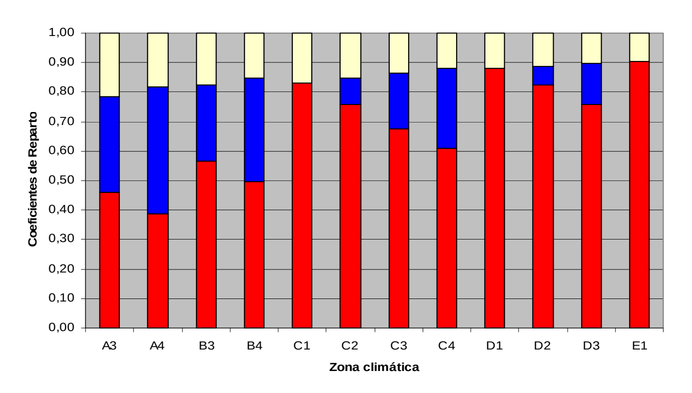


Fig. 11. Coeficientes de reparto en función de la zona climática.

Los Indicadores de eficiencia energética son las variables a partir de las cuales se obtiene, entre otras cosas, la clasificación energética de un edificio. Esta clasificación se incluye en la etiqueta de eficiencia energética que aparece en el Anexo II del Real Decreto de Certificación Energética de Edificios de Nueva Construcción 47/2007.

2.2. Influencia de la Demanda sobre la Eficiencia Energética

Si se analiza la expresión de consumo, a continuación, se observa que depende de la demanda y del rendimiento de los sistemas. Por tanto, para disminuir el consumo energético se debe disminuir la demanda energética o aumentar el rendimiento de los sistemas de climatización empleados.

$$C = \frac{Demanda}{\eta}$$

La demanda de energía de un edificio depende, por un lado, de sus ganancias térmicas producidas por las solicitaciones térmicas exteriores y de las solicitaciones interiores tales como el uso, la carga generada por los equipos eléctricos, la iluminación, etc.; y por otro lado, de sus pérdidas térmicas, dependientes de las características de la envuelta térmica, de los cerramientos, las ventanas, la ventilación e infiltraciones, etc.

Se tienen por tanto tres puntos fundamentales de trabajo:

- La mejora de la envuelta térmica (IEE demanda calefacción).
- La mejora del control solar (IEE demanda refrigeración).
- La mejora de los sistemas de climatización y producción de A.C.S. (IEE sistemas).

Por tanto, esos serán nuestros tres escenarios de optimización, analizando los límites viables de mejora de cada uno de los factores que componen estos aspectos y su repercusión individual en la energética edificatoria. Se puede establecer una estrategia general de reducción de la demanda:

EN INVIERNO:
DEMANDA = PÉRDIDAS – GANANCIAS

- Limitar pérdidas (p.ej. aumento del aislamiento).
- Promover ganancias (p.ej. mejora del acceso solar).

		Reducir pérdidas		Aumentar ganancias	
	Descripción	Transmisión	infiltración / ventilación	Aumentar área sur equivalente	Aumentar factor de utilización
Ubicación					
Diseño	Compacidad				
	Superficie acristalada				
	Orientación y distribución de la superficie acristalada				
Elementos convencionales	Mejora aislamiento opacos				
	Mejora calidad ventanas				
	Inercia				
Elementos y estrategias especiales					

Fig. 12. Cuadro de estrategia general de reducción de la demanda en Invierno.

EN VERANO:
DEMANDA = GANANCIAS – PÉRDIDAS

- Limitar ganancias (p.ej. mejora del control solar).
- Promover pérdidas (p.ej. incremento de la ventilación).

		Reducir ganancias		Aumentar perdidas	
	Descripción	Transmisión	Solares	Aumentar renovaciones aire exterior durante noche	Aumentar factor de utilización
Ubicación					
Diseño	superficie acristalada				
	Orientación y distribución de la superficie acristalada				
Elementos convencionales	Mejora aislamiento cubierta				
	Control solar				
	Ventilación nocturna				
	Inercia		Modular ganancias		
Elementos y estrategias especiales					

Fig. 13. Cuadro de estrategia general de reducción de la demanda en Verano.

2.2.1. Influencia del Diseño/Geometría del Edificio

La geometría del edificio es muy importante para el mayor aprovechamiento del sol (ganancias térmicas producidas por las solicitaciones térmicas exteriores) y para la reducción de pérdidas de energía [6].





La demanda de calefacción depende directamente de la compacidad del edificio, marcada por el diseño, y que se establece como el cociente entre la cantidad de los cerramientos expuestos al exterior (área de transferencia) y el volumen del edificio.

Por tanto, a mayor compacidad, por mayor volumen o por menor área de transferencia, menor demanda de calefacción, independientemente de la calidad constructiva empleada.

En la siguiente Tabla 1 se observa la variación de la compacidad en función de la tipología arquitectónica del edificio, cómo varía a igual forma pero con diferentes escenarios de su situación en la parcela y del número de plantas, suponiendo un mismo "edificio tipo", que tiene en planta 384 m² (16m x 24m).

Tabla 1
Variación de la compacidad en función de la tipología arquitectónica del edificio y del número de plantas

Número de Plantas	Aislado 384m² 10m x 38m	Aislado 384m² 16m x 24m	Pareado 384m² 16m x 24m	Entre medianeras 384m² 16m x 24m	Adosado 384m² 16m x 24m
1	1.09	1.14	1.23	1.33	1.41
2	1.71	1.85	2.09	2.40	2.67
3	2.11	2.32	2.72	3.27	3.79
5	2.59	2.93	3.58	4.62	5.71

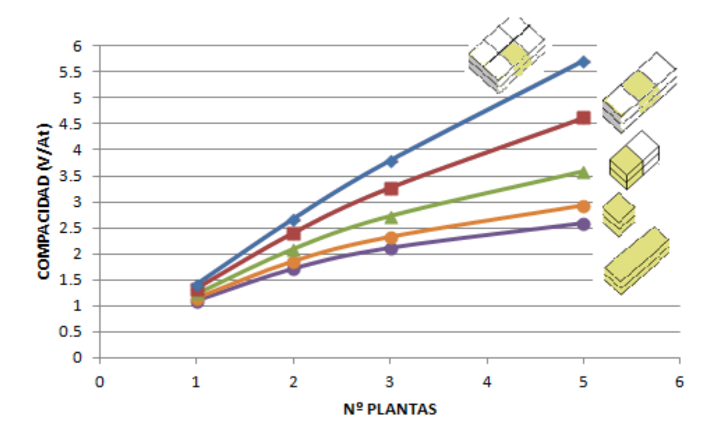


Fig. 14. Variación de la compacidad en función de la tipología arquitectónica del edificio y del número de plantas.

Se puede ver en la siguiente Figura 15 cómo afecta además la compacidad a la demanda de calefacción de los edificios en función de la zona climática donde se encuentran estos. Es por tanto, fundamental la geometría o volumetría del edificio en la energética edificatoria.

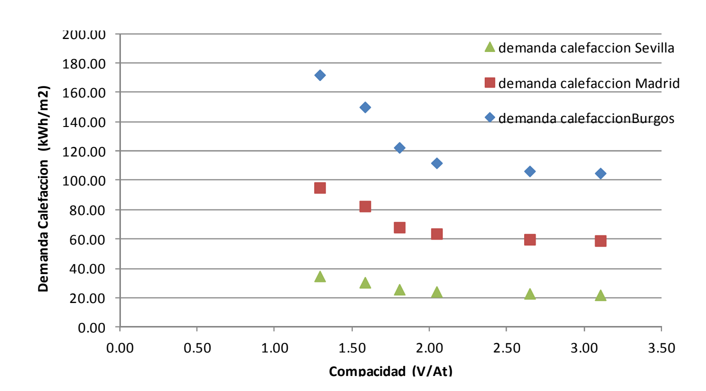
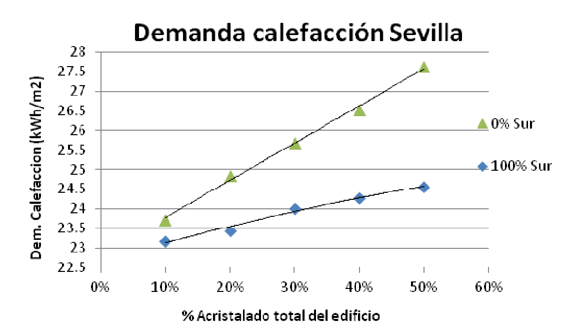
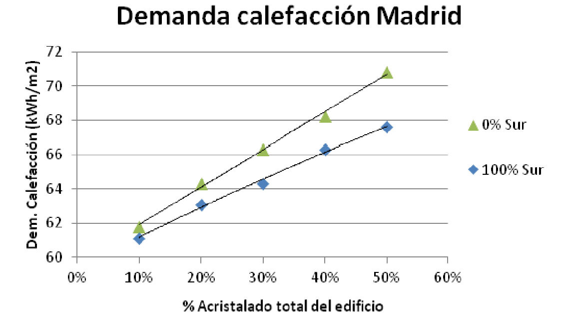


Fig. 15. Influencia de la variación de la compacidad en la demanda de calefacción.

2.2.2. Influencia de la Orientación de las Ventanas y el porcentaje acristalado

De forma análoga, la demanda de calefacción depende igualmente de la relación entre el área de ventanas y el área acondicionada, o dicho de otro modo, la dependencia existente entre área de huecos por metro cuadrado acondicionado (si el edificio está muy vidriado o poco), y en qué dirección están orientados los huecos.





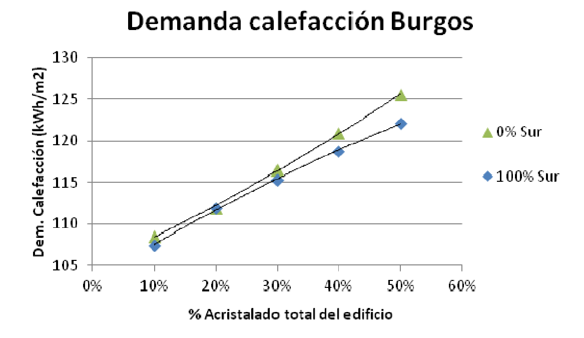


Fig. 16. Variación de la Demanda de Calefacción en función del porcentaje acristalado.

De esta manera, las condiciones de consumo de energía de partida del edificio proyectado pueden ser muy inferiores a las de un edificio poco estudiado, generando un mayor consumo de energía.

Si las demandas son lo suficientemente bajas, puede considerarse un edificio pasivo, que no necesitará sistemas de climatización, ya que la demanda de calefacción no sobrepasa los umbrales de discomfort térmico. Estos umbrales son marcados para Europa por el estudio de viviendas PASSIVE HOUSE, sin embargo, las condiciones climatológicas de España no permiten su transposición directa a los climas más favorables en invierno, es decir, a los menos severos en los meses de invierno.

Para un vidrio dado, la influencia del cambio de orientación está directamente ligada a la variación de la cantidad de radiación solar incidente en las dos orientaciones consideradas. Por lo tanto, y al igual que para los muros, el cambio de orientación es más significativo en las localidades con pocos días nublados.

Debido a la enorme influencia de la radiación solar sobre el comportamiento global de los vidrios, el cambio de orientación tiene una fuerte incidencia en la valoración de los vidrios. De hecho, existen orientaciones y localidades para las que el coeficiente de valoración es negativo, lo cual en primera instancia indica que la contribución neta del vidrio supone más ganancias que pérdidas o, dicho de otra manera, que el vidrio contribuye a reducir las necesidades de calefacción.

Llevado al extremo, se daría la paradoja de que en muchas localidades, podrían existir viviendas que no tendrían demanda de calefacción. Por ejemplo, una vivienda que no tuviera más que una sola fachada expuesta al Sur y esta fachada fuera completamente vidriada. Esto evidentemente es falso, entre otras razones porque el porcentaje de ganancia solar que se utiliza va disminuyendo a medida que aumenta la superficie del vidrio, mientras que las pérdidas específicas no se ven afectadas por este aumento.

2.2.3. Protecciones Solares y Sombras Remotas

Las ganancias solares son analizadas tanto en la evaluación de la demanda de calefacción como en la de refrigeración.

El procedimiento reconocido en su opción general, al ser mediante un cálculo horario, puede sin problemas evaluar los escenarios de sombras diarios que generan tanto las propias como los edificios colindantes y demás obstáculos remotos. El procedimiento simplificado base mostrado tiene en cuenta las sombras propias y las remotas, generadas por obstáculos ajenos al edificio, vegetación o la edificación colindante en entornos urbanos.

• *Obstáculos Remotos*

Para el análisis en régimen de calefacción, se analiza la obstrucción de los huecos que reciben radiación solar directa en estas orientaciones, sin la intervención de las sombras propias (planteadas como medida de intervención pasiva para el verano).

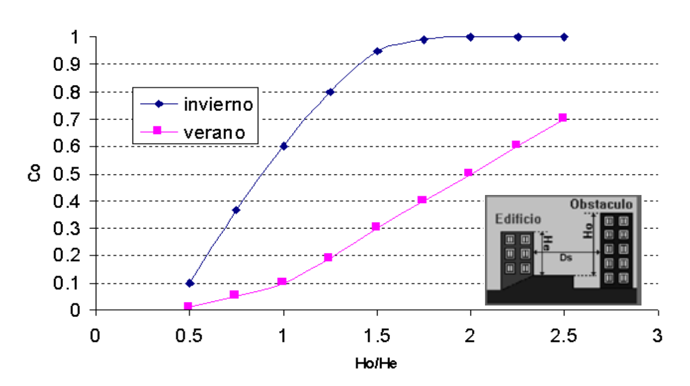


Fig. 17. Descripción de los parámetros de sombreamiento en obstáculos lejanos.

Asimismo, en régimen de refrigeración se analiza el porcentaje de huecos protegidos que no reciben radiación solar directa gracias a, por un lado, la intervención de las sombras remotas, por la configuración y ubicación de edificios del entorno, y por otro, a la intervención de las propias protecciones solares incluidas para cada hueco, bien sean retranqueos, voladizos, toldos, lamas o cualquier otro dispositivo de sombra exterior.

Las sombras se evalúan en las tres direcciones principales captoras: orientación Este, Sur y Oeste.

Como muestra la Figura 18, a continuación, el control solar mediante voladizos superiores en huecos de fachada depende de la geometría del sistema de protección solar.

Las curvas del factor de sombra producido por los diferentes diseños se vuelven asintóticas a medida que se aumenta la longitud de voladizo, por lo que efecto sobre el control solar se amortigua hasta saturarse en torno a una longitud de voladizo igual al doble de la altura de la ventana, como muestra la gráfica de la figura siguiente.

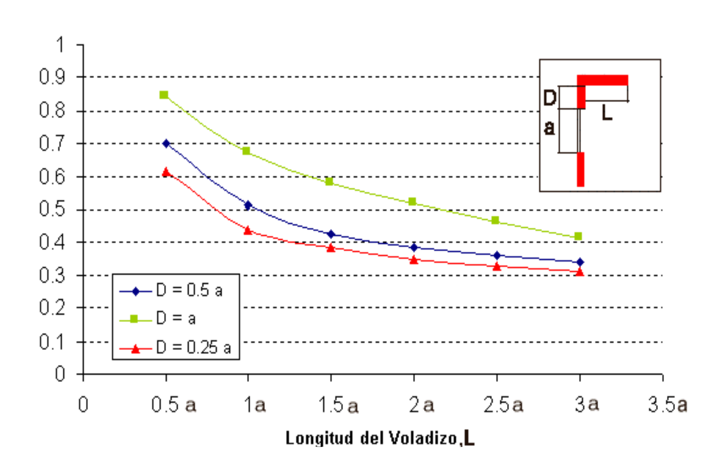


Fig. 18. Factor de control solar obtenido mediante obstáculos de fachada (voladizos superiores con orientación al Sur en verano).

2.3. Influencia de las Soluciones Constructivas

2.3.1. Cerramientos opacos

Los cerramientos opacos quedan caracterizados directamente mediante su transmitancia térmica (U) medida en W/m²K. La transmitancia térmica depende directamente del espesor de las capas del cerramiento y las características térmicas o aislantes de cada de ellas, su conductividad λ (W/m·K).

El ahorro de la demanda de calefacción asociado al incremento de espesor de aislante en un muro se muestra en la Figura 19.

En este mismo sentido se conoce que el ahorro relativo que genera cierto espesor de aislamiento depende de la zona climática en la que se ubique el edificio. Se define comúnmente a este hecho como el aprovechamiento real del espesor de aislante para las localidades de Madrid, Sevilla y Burgos. Se puede ver como el efecto de incluir un centímetro de aislante es muy considerable para cualquier zona climática, sin embargo, la figura también muestra cómo se satura la influencia del espesor de aislante en un cerramiento por la asintoticidad de las curvas.

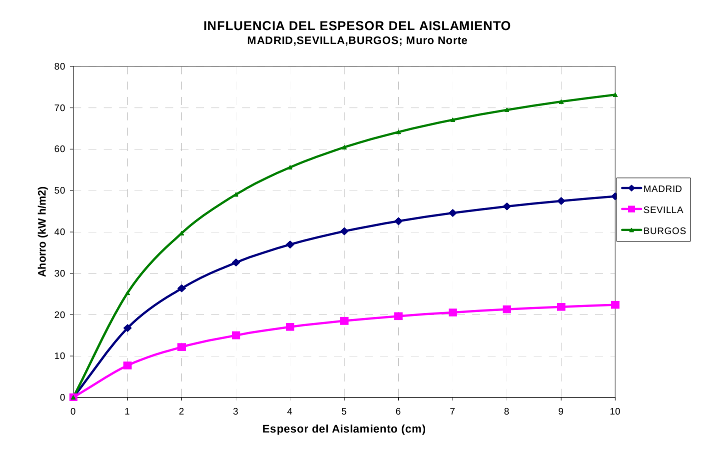


Fig. 19. Influencia del espesor de aislamiento para diferentes zonas climáticas.

Para el análisis de las soluciones constructivas se proponen una serie de combinaciones fijas de transmitancias térmicas de fachadas, cubiertas y suelos que reducen el número posible de variables y que contemplan la mayoría de las soluciones adoptadas en la construcción hoy en día.

La transmitancia más alta de todas las bases de las zonas climáticas, en concreto, es la de la zona climática A3, de transmitancia 0,94 W/m²·K, la menor viable de 0,30 W/m²·K para espesores máximos asequibles en proyecto y una media entre estos dos valores (0,68 W/m²K).

Tabla 2
Transmitancias térmicas básicas, mejoradas y óptimas para cada zona climática

	U_{CTE}			$U_{CTE}+$			$U_{CTE}++$		
(W/m^2K)	U_{Mlim}	U_{Clim}	U_{Slim}	U_{Mlim}	U_{Clim}	U_{Slim}	U_{Mlim}	U_{Clim}	U_{Slim}
A	0.94	0.5	0.53	0.7	0.47	0.53	0.64	0.43	0.53
B	0.82	0.45	0.52	0.66	0.4	0.52	0.55	0.36	0.52
C	0.73	0.41	0.5	0.51	0.33	0.5	0.39	0.28	0.5
D	0.66	0.38	0.49	0.47	0.31	0.49	0.36	0.26	0.38
E	0.57	0.35	0.48	0.4	0.29	0.42	0.31	0.25	0.37

2.3.2. Huecos

Los cerramientos transparentes (ventanas y huecos) quedan caracterizados mediante su transmitancia térmica (U) medida en W/m²·K en función de la temperatura exterior e interior además del factor solar de vidrio (g) y la iradiancia I (W/m²), por lo que depende fuertemente de la orientación de las ventanas, como muestra la ecuación de la figura siguiente.

El ahorro de la demanda de calefacción asociado a la mejora del acristalamiento se muestra en la Figura 20.

Se puede ver cómo la mejora producida por la variación del vidrio depende fuertemente de la orientación de las ventanas, por lo que si el sobrecoste de la sustitución es constante, es mucho más interesante en ciertas orientaciones que en otras. Por ejemplo, la sustitución de vidrio simple por vidrio doble en orientación Norte supone un ahorro de 80 kWh/m², sin embargo, este mismo cambio en ventanas de orientación Sur, sólo supone un ahorro de 30 kWh/m², siendo el coste idéntico en ambos escenarios.

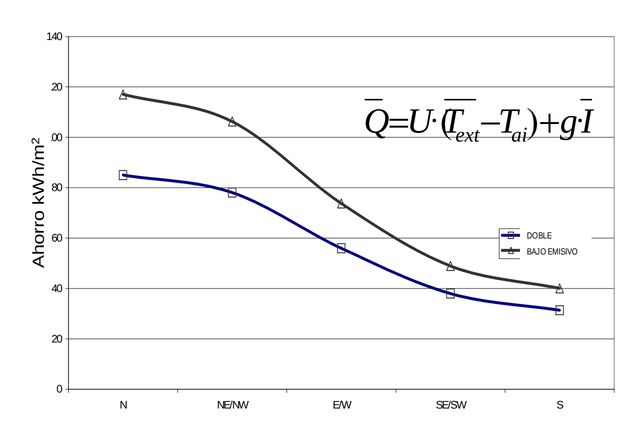


Fig. 20. Ahorro si un vidrio simple se sustituye por uno doble o bajo emisivo (Madrid, Noviembre-Abril).

Las revisiones periódicas del Código Técnico recogerán las necesidades de mejora de calidad de huecos en función de la zona climática.

La Tabla 3, a continuación, muestra una propuesta de mejoras de los vidrio para las presente revisión de los parámetros básicos de cerramientos de la Sección HE1 del Código Técnico de la Edificación.

Tabla 3
Transmitancias térmicas de referencia de ventanas para cada zona climática

Zonas climáticas	A	B	C	D	E
CTE-HE 2006	5.70	5.70	4.40	3.50	3.10
CTE-HE 2012	2.50	2.20	1.80	1.60	1.55

2.3.3. Soluciones Especiales

Los procedimientos generales no asumen a día de hoy la posibilidad de emplear soluciones constructivas especiales como muros trombe, fachadas ventiladas, etc., aunque ya está redactado y aceptado el procedimiento a seguir para su implementación en la normativa y se están empezando a presentar los documentos reconocidos para ello; en ellos se reconocerán estas soluciones como "Capacidades Adicionales".

Al no estar estos elementos implementados para los procedimientos generales, tampoco lo están para los procedimientos simplificados. Sin embargo, existen tesis y estudios pormenorizados que han generado un profundo conocimiento de dichas soluciones. Por ejemplo, las soluciones de muro Trombe y muro Solar [7] se encuentran suficientemente estudiadas como para la aplicación directa en estudios energéticos.

• *Muro Trombe*

Un muro Trombe o muro Trombe-Michel, es un muro o pared orientada al sol, construida con dos hojas separadas por una cámara de aire; la hoja interior debe estar construida con materiales que puedan acumular calor bajo el efecto de masa térmica (tales como piedra, hormigón, adobe o agua), y la hoja exterior, por una lámina de vidrio formando un colector solar térmico.

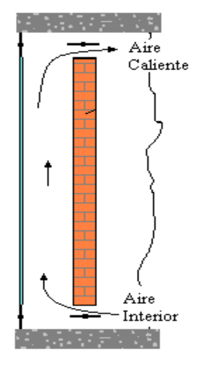


Fig. 21. Funcionamiento del Muro Trombe en Invierno.

Un muro Trombe moderno posee aperturas en la parte inferior y superior del mismo para permitir que el aire menos caliente ingrese por la parte inferior (Fig. 21), luego circule en la cámara de aire entre la superficie exterior del muro y el vidriado y con más calor salga por el orificio superior hacia el ambiente interior. Esto puede explicarse bajo el fenómeno físico denominado convección. Como la masa térmica del muro acumuló el calor del día, éste irá entregando lentamente el calor al interior del local a lo largo de la noche. Los orificios de ventilación deben poseer rejillas o esclusas a modo de compuertas para regular el flujo del calor y evitar un flujo inverso nocturno que enfríe el ambiente interior en vez de calentarlo. También pueden incorporarse ventiladores en la parte superior e inferior del vidriado exterior para refrescar el ambiente interior durante el verano evitando un sobrecalentamiento del muro.

Durante la noche, la masa térmica puede ayudar a amortiguar y reducir significativamente las pérdidas de calor. En los diseños más actuales se utilizan nuevas tecnologías que permiten un aislamiento térmico transparente conservando el calor capturado durante el día y, en consecuencia, reduciendo las dimensiones del muro Trombe respecto de las dimensiones del local. Este aislamiento no sólo reduce las pérdidas de calor nocturnas, sino que permite bajar los costos mejorando la ganancia de calor diurna.

• *Muro Solar*

Solución igual que el Trombe pero sin recirculación de aire.

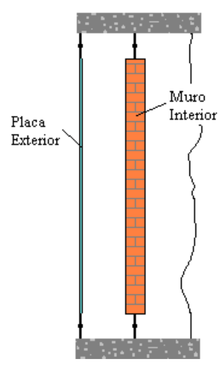


Fig. 22. Muro solar.

Al ser cerramientos con una cámara de aire tras una hoja de vidrio, éstos poseen unas mayores ganancias solares a la vez que se amortigua la temperatura exterior para la hoja opaca interior, por lo que también posee menos pérdidas. Esta complementariedad hace de estos cerramientos unas interesantes propuestas en las medidas pasivas de la arquitectura energéticamente eficiente.

Como resumen, podemos remarcar que si el comportamiento descrito lo trasladamos a la matemática del comportamiento de balance energético que posee, se puede decir que:

$$U_{muro_corregido} = (1 - Mejora) \cdot U_{cte}$$

Por tanto, podemos sustituir cualquier superficie de cerramientos al Sur por una transmitancia equivalente igual a la transmitancia del muro base multiplicada por la acción de la mejora térmica del muro implementado.

Se muestran a continuación las gráficas (Fig. 23) de mejoras obtenidas para las principales capitales de provincia de cada zona climática.

Desde éstas, se han generado las tablas de mejoras que suponen los muros Trombe y solares en cada zona climática como vemos en el ejemplo siguiente, para zona climática E1 (Burgos).

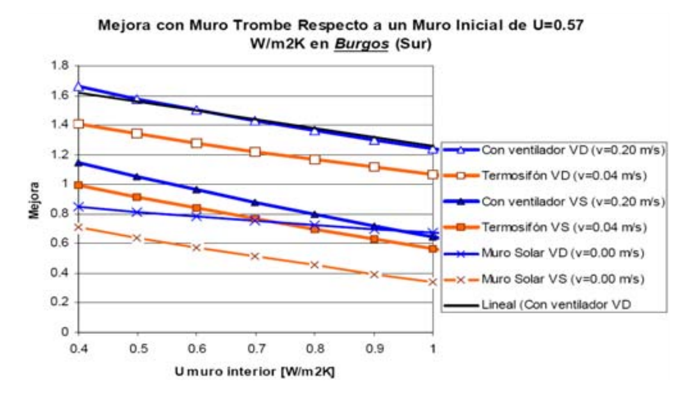


Fig. 23. Mejora de la transmitancia del muro base tras la colocación de un muro trombe.

De esta manera, se obtiene que para Sevilla, cuyo muro base tiene una transmitancia térmica de 0,82 W/m²K, la mejora de un muro solar es 0.75 W/m²K, por lo que la transmitancia final del muro sería:

$$U_{muro\ corregido} = (1 - 0{,}75)U_{cte} = 0{,}25U_{cte} = 0{,}205\ W/m^2K$$

Es decir, la transmitancia térmica del muro corregido mediante un muro solar es cuatro veces mejor que el inicial.

Analizando la ecuación y la grafica anteriormente presentada se deduce que cualquier solución que se tome cuya mejora sea igual o superior a 1 supone que el cerramiento tendría una transmitancia igual o menor de cero, es decir, negativa.

Es decir, que en régimen de invierno, el muro en cuestión no tiene pérdidas sino ganancias térmicas, disminuyendo la demanda de calefacción interna del edificio.

Se considera, para el cálculo que estos muros ocupan sólo las bandas continuas verticales entre ventanas del área total de la fachada Sur (un 80%), como muestra la imagen.

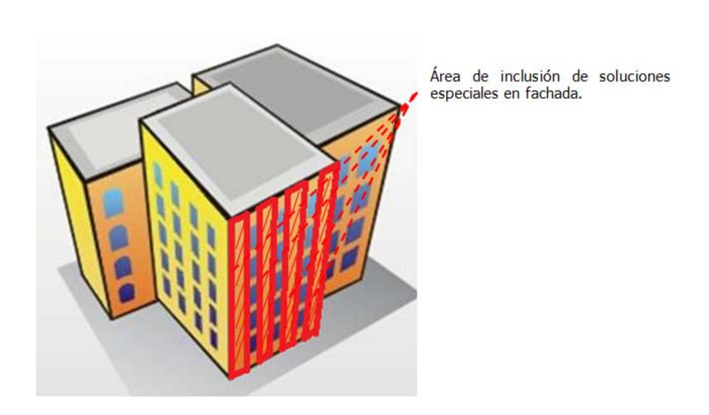


Fig. 24. Área de inclusión de soluciones especiales en fachada.

2.3.4. Tratamientos de Puentes Térmicos

La calificación energética de edificios de viviendas recoge la influencia de los puentes térmicos como una constante en la demanda de calefacción, dependiente de la zona climática en la que se encuentre el edificio, y que se muestra en las figuras a continuación:

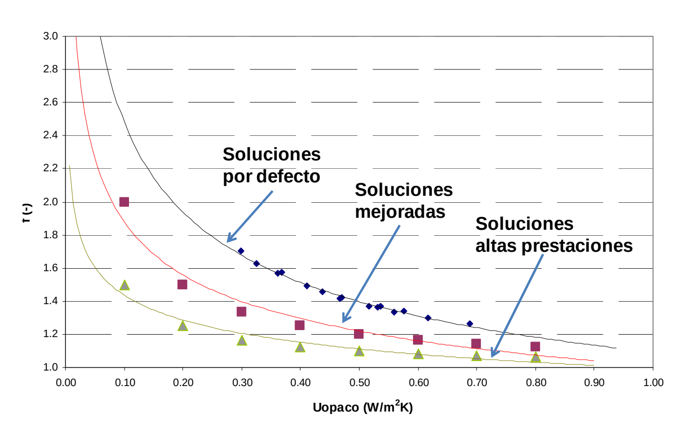


Fig. 25. Influencia de puentes térmicos en función de la calidad de los cerramientos.

Los puentes térmicos van asociados a las soluciones constructivas empleadas y los detalles de ejecución para puntos críticos como encuentros de fachadas con el suelo, con forjados de plantas intermedias, o con la cubierta.

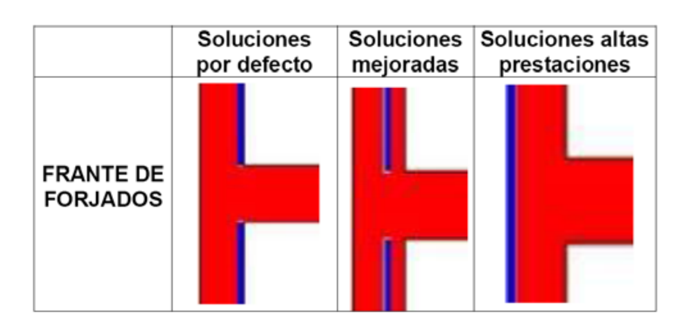


Fig. 26. Soluciones de puentes térmicos.

El procedimiento general asume varias tipologías de puentes térmicos incluyendo un factor corrector del valor del procedimiento simplificado para los puentes térmicos.

Esto se realiza sabiendo que el valor menor que pueden adoptar los puentes térmicos es que afecten a la demanda de calefacción; como mínimo, será en torno a un cuatro por ciento (4%), y como máximo estará en torno a un cincuenta por ciento (50%).

Por ejemplo, para cerramientos que cumplen estrictamente los requerimientos que marca el Código Técnico de la Edificación en zonas climáticas B4 (Sevilla) su transmitancia es 0,82 W/m²K. Puede verse en la figura anterior que la influencia del puente térmico por defecto es del 20%, es decir, tiene un factor de puente térmico de 1,20. Por otro lado, la mejor solución constructiva para resolver los puentes térmicos sólo afectará a la transmitancia en un 4%. Puede verse en la figura anterior

que la influencia del puente térmico ahora tendría tan sólo un factor de puente térmico de 1,04. Será fundamental entonces el análisis de las soluciones constructivas asociadas a los procesos constructivos en los que se pretende prestar especial atención a la energética edificatoria.

2.4. Procedimiento de optimización energética de edificios de viviendas

Como se comentaba anteriormente, el objetivo principal de este REAL DECRETO 47/2007, del Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción consiste en establecer el Procedimiento básico que debe cumplir la metodología de cálculo de la calificación de eficiencia energética, con el que se inicia el proceso de certificación, considerando aquellos factores que más incidencia tienen en el consumo de energía de los edificios de nueva construcción, así como establecer en el mismo las condiciones técnicas y administrativas para las certificaciones de eficiencia energética de los proyectos y de los edificios terminados. Por tanto, es de interés para la administración el control de Certificaciones de eficiencia energética de Edificios que se estén o se hayan desarrollado en sus comunidades autónomas.

Si se crea una tabla con los Índices de Eficiencia Energética de calefacción en un eje, los Índices de Eficiencia Energética de refrigeración en el otro y fijamos el de agua caliente sanitaria, podemos rellenar cada celda con el siguiente resultado:

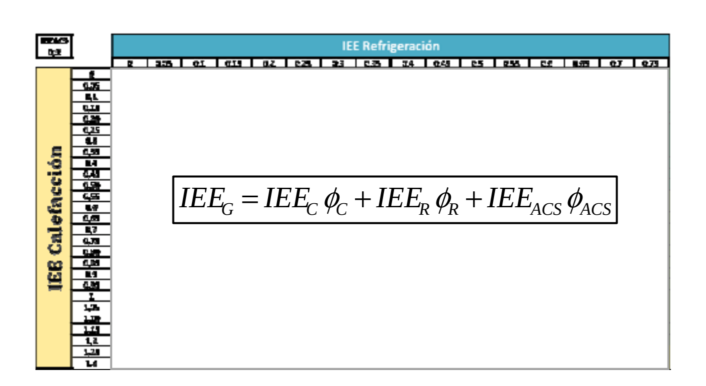


Fig. 27. Cuadro de toma de decisiones.

Dado que conocemos los coeficientes de reparto, el resultado de los cruces para cada casilla serán Índices de Eficiencia Energética (IEEs) globales.

Al conocer además los límites de la escala para cada zona climática y tipología edificatoria, podemos transformar estos valores globales en sus calificaciones energéticas asociadas (Fig. 28).

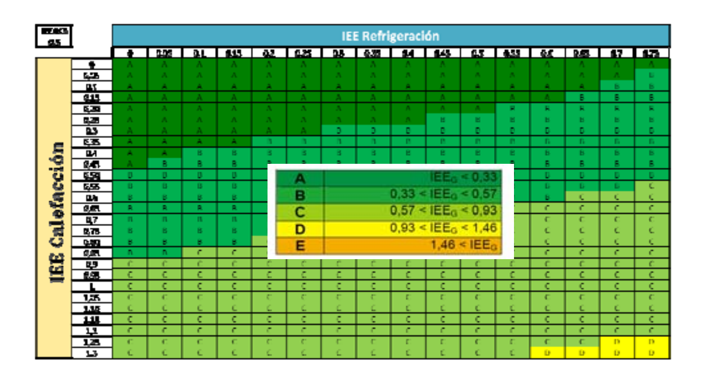


Fig. 28. Cuadro de toma de decisiones completado.

Si se conocen los valores de IEE de calefacción y refrigeración, tanto en demanda como de sistemas, la zona climática y la tipología del edificio, se puede ubicar la posición del caso en el cuadro general de partida según la calificación energética global del edificio, y automáticamente se tendrán referencias respecto a las demás calificaciones posibles.

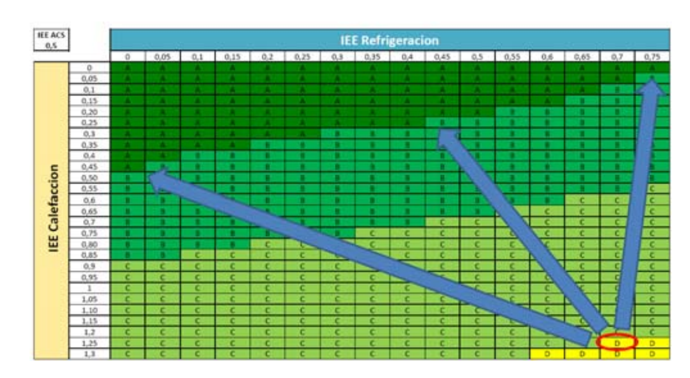


Fig. 29. Movimientos posibles sobre el cuadro de toma de decisiones.

A modo de estudio cualitativo, se mostrarán a continuación los tres tipos de movimientos posibles en el cuadro general de partida:

- En primer lugar, movimientos sobre el eje vertical, mejoras en la calefacción, bien sea en la demanda o en los sistemas que posee el edificio.

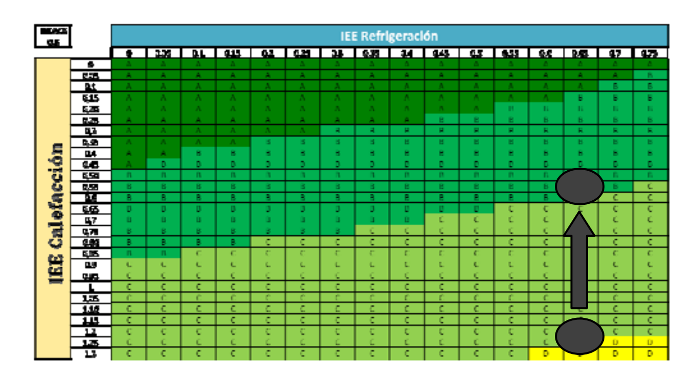


Fig. 30. Movimiento vertical sobre el cuadro de toma de decisiones.

En la mejora de la demanda se pueden considerar varios escenarios posibles, tantos como aspectos dependientes posee la calefacción dentro de la energética global edificatoria y que quedan descritos en puntos anteriores.

2. En segundo lugar, movimientos sobre el eje horizontal, mejoras en la refrigeración, bien sea en la demanda o en los sistemas que posee el edificio.
   En la mejora de la demanda se pueden considerar varios escenarios posibles, tantos como aspectos dependientes posee la refrigeración dentro de la energética global edificatoria y que quedan descritos en puntos anteriores.
   En este caso, con la mejora de calefacción se obtiene una mejora en la calificación final hasta la letra B, mientras que las mejoras en el eje de refrigeración no tienen una repercusión directa sobre la mejora de calificación final, puesto que no se ve alterada; de este modo, parece claro que en este caso se debe prestar especial atención a la mejora de calificación.

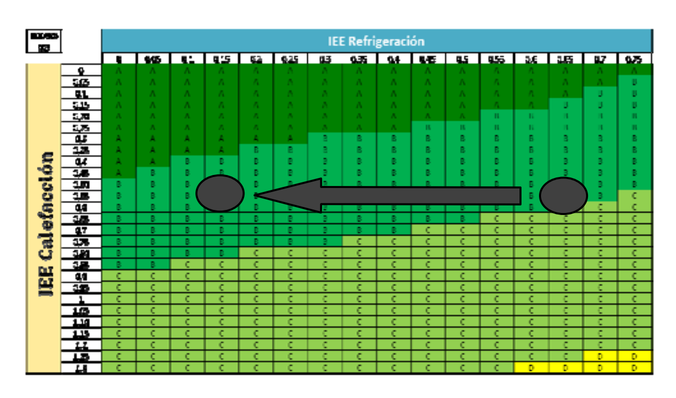


Fig.31. Movimiento horizontal sobre el cuadro de toma de decisiones.

3. En tercer lugar, movimientos sobre combinados del eje horizontal y vertical, mejoras en la calefacción y refrigeración al mismo tiempo. Sólo pueden darse por mejoras de los sistemas que posee el edificio, y sólo mediante sistemas generadores de calefacción y refrigeración, es decir, bombas de calor.

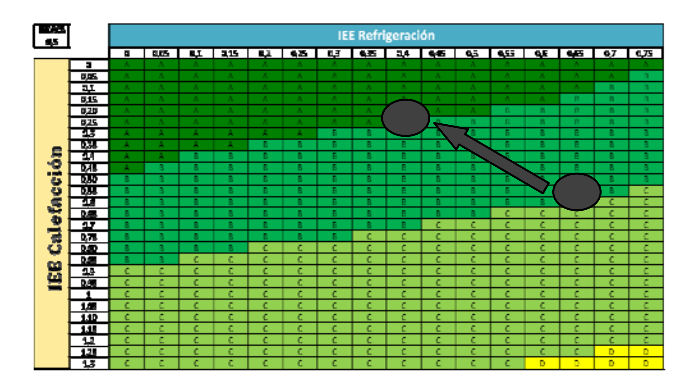


Fig. 32. Movimientos mixtos sobre el cuadro de toma de decisiones.

De los cuadros generales se deduce que las intervenciones de mejora o los esfuerzos previos de interés en fase de proyecto, deben recaer sobre la calefacción o refrigeración dependiendo del esquema que posea el cuadro general. Éste principalmente depende de dos factores:

- la zona climática de verano en que se encuentre el caso,
- y la tipología edificatoria de que se trate.

Así, se observa en los siguientes cuadros de partida, la importancia de las zonas climáticas de verano en las tabulaciones de la calificación energética final.

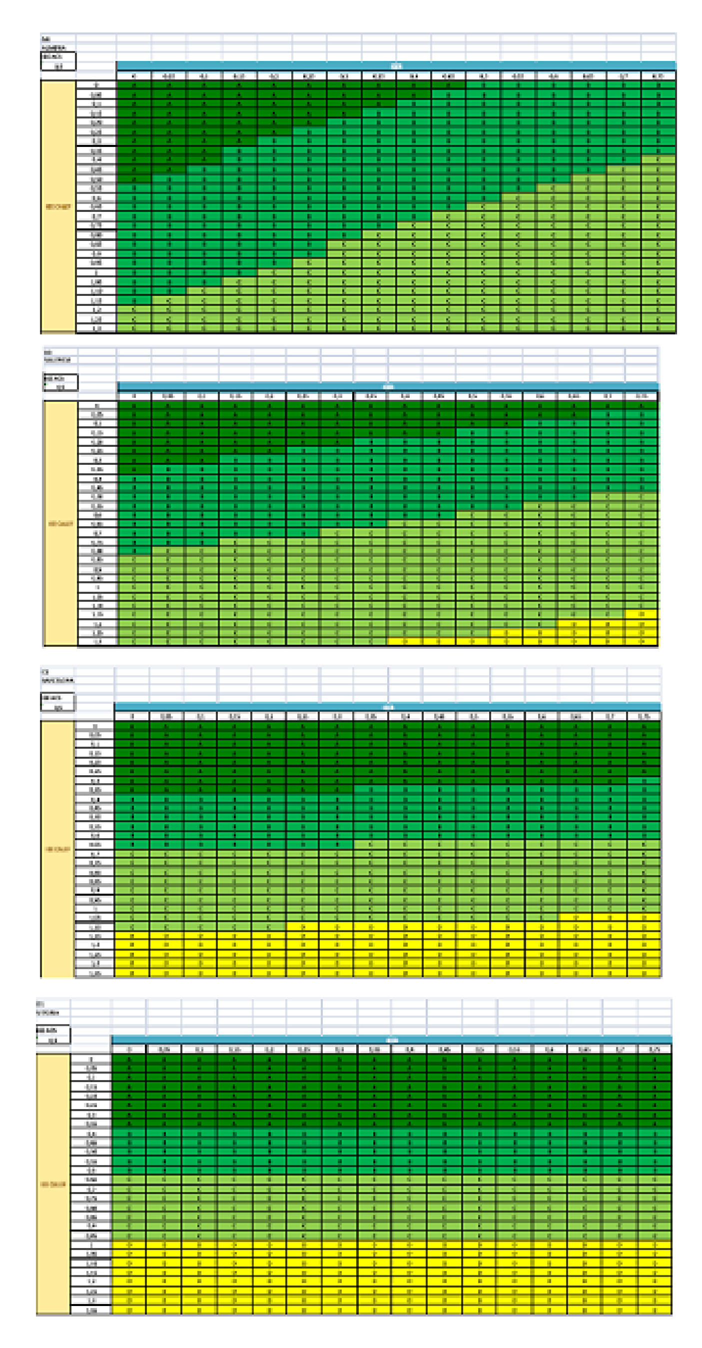


Fig. 33. De izquierda a derecha, ZC de verano 4, ZC de verano 3, ZC de verano 2 y ZC de verano 1.

Si se imagina un punto de arranque común y el objetivo es obtener edificios de alta calificación energética, queda claro que no se deben enfocar de igual modo las soluciones de proyecto independientemente de la zona en la que se encuentre éste. Así, será el proyectista el encargado de analizar cuáles serán los movimientos más interesantes para alcanzar el objetivo final.

Si se conocen los elementos básicos del proyecto, podemos establecer un procedimiento para la búsqueda de soluciones que consigan las modificaciones necesarias para la obtención de una alta calificación energética:

1. En primer lugar, como se ha comentado al inicio de este punto, lo primero es *establecer la zona climática* en la que se encuentra el caso en concreto y si el edificio es unifamiliar o bloque.
2. En segundo lugar, se ha de *determinar si el sistema de producción de agua caliente sanitaria es común o se plantea instalar sistemas de alta eficiencia.* Estas dos soluciones generan dos cuadros generales de toma de decisiones anteriormente descritos: uno, donde se fija el valor de IEEacs = 1 y otro, de IEEacs = 0,5.
   Si el índice de eficiencia energética de demanda de agua caliente sanitaria (IEEdacs), cumpliendo el actual CTE-HE4, es IEEdacs = 0,60 supone que para obtener un IEEacs = 1, índice de eficiencia energética de sistema de A.C.S. debe ser IEEsacs = 1,60, y que para obtener un IEEacs = 0,50, el índice de eficiencia energética de sistema de agua caliente sanitaria debe ser IEEsacs = 0,8.
   Cuanto mejor es la producción de agua caliente, más contribuye en la energética, y por tanto, se reducen los requerimientos necesarios para calefacción y refrigeración.
   Se supone un sistema de alta eficiencia para la producción de agua caliente sanitaria, por ejemplo, una caldera de gas natural, por lo que se toma la tabla de IEEacs = 0,50 y por tanto, se desarrolla a continuación la segunda de las tablas mostradas anteriormente.
3. En tercer lugar, se debe *seleccionar* una casilla de *calificación final deseada*, que sea una solución *viable técnica y económicamente*, por lo que de entre toda la franja de letras no se tomará una centrada en la zona sino justo en el borde de cambio de letra, en este caso entre la zona de calificación A y B; y de entre la línea limítrofe entre zonas de clase, una centrada, que implica un control y medidas de actuación tanto en la calefacción como en la refrigeración del edificio.

Se tienen por tanto tres puntos fundamentales de trabajo:

- La mejora de la envuelta térmica (IEE demanda calefacción).
- La mejora del control solar (IEE demanda refrigeración).
- La mejora de los sistemas de climatización y producción de A.C.S. (IEE sistemas).

Por tanto, esos serán nuestros tres escenarios de optimización, analizando los límites viables de mejora de cada uno de los factores que componen estos aspectos y su repercusión individual en la energética edificatoria.

4. En cuarto lugar, la ubicación del punto de partida para valores básicos de cumplimiento del Código Técnico de la Edificación. Si se toman los valores base que cumplen estrictamente el Código Técnico, ubicamos el edificio en el cuadro general de toma de decisiones, desde el que poder buscar soluciones de optimización.
   El punto de partida de cada edificio no es siempre el mismo, es directamente dependiente del diseño y condiciones ambientales de la ubicación, por lo que según la calidad de diseño (en cuanto a energética se refiere) será más o menos viable alcanzar las altas calificaciones energéticas.

Se puede ver también que hay tres opciones para llegar a obtener en este caso alta calificación letra A: [A1] Sólo mejorar la calefacción (movimientos en el eje vertical); [A2], una mejora conjunta de calefacción y refrigeración, ascendiendo en una línea de 45º en el cuadro general; o [A3], mejorar la refrigeración (movimientos en el eje horizontal) que disminuyen la necesidad de mejora de la calefacción.

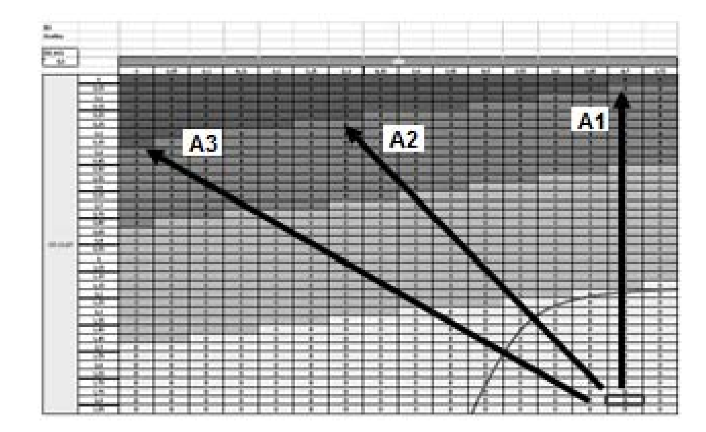


Fig. 34. Opciones para llegar a obtener en este caso alta calificación Clase A

De este modo, quedan determinados los Índices de Eficiencia Energética de Calefacción y Refrigeración que debe obtener el edificio final a través de las medidas de diseño de la envolvente y los sistemas destinados al confort energético en calefacción y de forma análoga para la refrigeración.

De este modo, se podrían determinar los niveles de mejora necesarios de la envolvente térmica y de los sistemas de calefacción para obtener el IEE de calefacción necesario. De forma análoga se desarrolla el estudio de mejora del control solar (IEE demanda refrigeración), y sus sistemas de refrigeración.

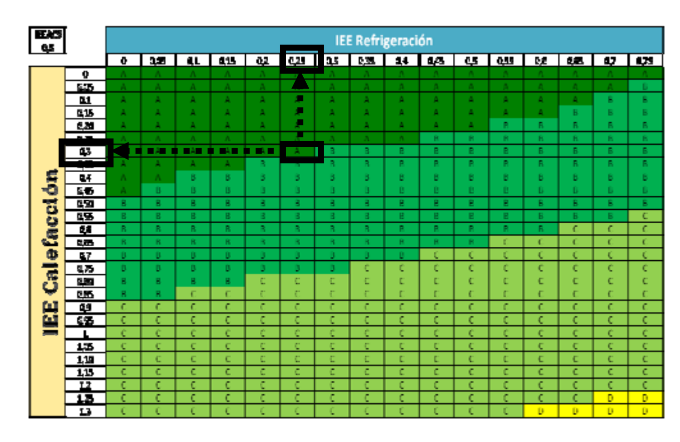


Fig. 35. Índices de Eficiencia Energética de Calefacción y Refrigeración que debe obtener el edificio final.

3. Proyectos. Ejemplos de Edificios de Alta Eficiencia

3.1. Escuela Infantil en Rivas. Madrid. 2010

Estudio de Arquitectura Ecosistema Urbano. Madrid.

El proyecto "Plaza Ecópolis" desarrollado por el Estudio de Arquitectura Ecosistema Urbano tiene por objeto incorporar la idea de la sostenibilidad en la vida cotidiana, no sólo reduciendo el consumo de energía a través del diseño, sino también sensibilizando a la población sobre su comportamiento en cuanto al consumo.

Se trata de un proyecto de regeneración de un solar de la periferia de Madrid, rodeado por infraestructuras de transporte y adyacente a un polígono industrial, en un espacio público para la interacción social.

Para Ecosistema Urbano los proyectos como "Plaza Ecópolis" suponen una manera de inculcar la sostenibilidad a los niños que, en consecuencia, se convertirán en adultos responsables.

Las tecnologías aplicadas en el proyecto ayudan a minimizar el consumo de energía y recursos naturales. En colaboración con el grupo de Investigación de Termotecnia de la Escuela de Ingeniería Industrial de Sevilla, se desarrolló la simulación energética del edificio, clave para entender el comportamiento energético, consiguiendo ajustar al máximo el presupuesto disponible a las necesidades básicas del edificio. La combinación de sistemas pasivos de ahorro y activos de eficiencia energética permite alcanzar la calificación energética más eficiente (Calificación Energética A).

Un porcentaje importante del edificio (50%) se encuentra semienterrado para beneficiarse de la inercia térmica del terreno y una gran fachada (700 m2) orientada al Sur aprovecha al máximo la luz y el calor. Ambas, son decisiones básicas para definir la relación física entre el edificio y su entorno. Una capa textil exterior dispuesta sobre una estructura metálica ligera envuelve el volumen de hormigón, siendo parte de ella móvil para adaptarse a las posiciones del sol. Este elemento bioclimático difumina el límite entre exterior e interior, extendiendo el confort climático del edificio hacia el espacio público.

Los resultados de demandas obtenidas son las marcadas en la tabla siguiente, originándose una Calificación C en Demanda de Calefacción, y B en Demanda de Refrigeración.

Tabla 4
Índices de Eficiencia Energética de Calefacción y Refrigeración del edificio final

	Valor edificio objeto	Valor edificio de referencia	Indicador de Eficiencia Energética IEE y Clase asociada
Demanda Calefacción	49.8 kWh/m²	69.5 kWh/m²	0.72 C
Demanda Refrigeración	7.9 kWh/m²	15.8 kWh/m²	0.50 B

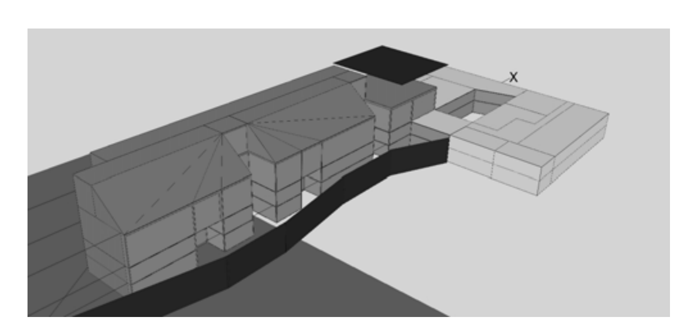


Fig. 36. Modelo del edificio desarrollado en Calener VYP para obtención del edificio de referencia y sus coeficientes de reparto.

Los coeficientes de reparto son Indicadores de la repercusión de cada uno de los sectores energéticos en la Calificación del edificio. Son referencia y medio de focalizar las líneas de trabajo y mejora del Edificio objeto de estudio. Pueden obtenerse del análisis de las emisiones de CO_2 del edificio de referencia.

	Coeficientes de Reparto
Calefacción	0.740
Refrigeración	0.060
ACS	0.003
Iluminación	0.197

Esto significa que el 74% de la energética global del edificio depende de la Calefacción mientras que tan sólo el 6% depende de la Refrigeración. Por tanto, se establecen así órdenes de magnitud previos a la intervención, o búsqueda de las soluciones más eficientes ante este edificio en particular.

• *Alternativas en la situación actual*

Una vez analizado el edificio de partida, y optimizadas sus demandas energéticas gracias a la mejora de la epidermis con respecto al edificio de referencia, tal y como queda expuesto en la figura posterior (Fig. 39) donde aparecen las Calidades de los cerramientos, se proponen ahora mejoras de implementación del proyecto para los sistemas que alberga:

La calificación energética de un edificio queda establecida en función de las emisiones de CO_2 que genera para cada una de las secciones de energía:

- sistemas de climatización (calefacción – refrigeración),
- agua caliente sanitaria e,
- iluminación.

Cada una de estas secciones de energía dependen directamente de la demanda que genera el edificio (su epidermis, orientación, y ubicación) y del rendimiento de los sistemas planteados (COP´s y EER´s).

La Fig. 38 representa las posibilidades viables técnicas y económicas para la obtención de alta calificación energética según la expresión siguiente desarrollada en los puntos anteriores:

$$IEE_G = IEE_C \cdot \varphi_C + IEE_R \cdot \varphi_R + IEE_{ACS} \cdot \varphi_{ACS}$$

En la siguiente figura (Fig. 37) aparecen fijadas las condiciones de la envuelta (IEEs de Demanda) y supone varios posibles sistemas de climatización (IEEs de Sistemas), e iluminación, sobre la combinatoria de resultados posibles se puede seleccionar la más interesante para el promotor por el sobrecoste asociado a esas medidas, asegurándose así que la calificacion final del edificio no se verá modificada durante el proceso de ejecución del edificio.

	IEE Demanda	IEE Sistemas	IEE	Coeficientes de Reparto	
Calefacción	IEE_{DC} = 0.71	IEE_{SC} = 0.4 - 0.55	IEE_C =	0.74	
Refrigeración	IEE_{DR} = 0.5	IEE_{SR} = 0.47 y 0.58	IEE_R =	0.06	
ACS	IEE_{DACS} = 1	IEE_{SACS} = 1	IEE_{ACS} = 1.00	0.00	
ILUMINACION			IEE_{ILUM}= 0.60 y 0.85	0.20	
				IEE Global S	

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA

Indicador de Eficiencia Energética Global	Valor	Calificación Parcial
IEE_G		

A	0.00	IEE<	0.40
B	0.40	<= IEE <	0.65
C	0.65	<= IEE <	1.00
D	1.00	<= IEE <	1.20
E	1.20	<= IEE <	--

Fig.37. Cuadro de toma de decisiones empleado para el estudio de alternativas energéticas para Ecópolis. Estudio de Arquitectura Ecosistema-Urbano. Madrid, 2010.

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA ECOPOLIS RIVAS
DEL ESTUDIO [ECOSISTEMA_URBANO] Madrid

aicia

SISTEMA EN INVIERNO / DIA

SISTEMA EN VERANO / NOCHE

	Limitacion de la demanda	Eficiencia Energética	Energías Renovables
Climatizacion: Calefacción y Refrigeración	Optimización niveles de aislamiento Control solar Minimización de infiltración no deseadas	Sistema de climatización de alto rendimiento condensación por agua	Disipación de calor residual mediante refrigeración evaporativa
Ventilación	Minimización de infiltración no deseadas	Recuperadores de calor	Fuentes y sumideros ambientales: Algibes en cubierta
Iluminación	Iluminación natural Controles encender/apagar Lámparas de bajo consumo	Sistemas de iluminación con balasto electrónico de alta eficiencia	Control solar motorizados y automaticos

Reciclabilidad

Vida Útil

Eficiencia Energética

Fig. 38. Estudio de alternativas aplicadas para el Proyecto de Escuela Infantil. Estudio de Arquitectura Ecosistema Urbano. Madrid, 2010

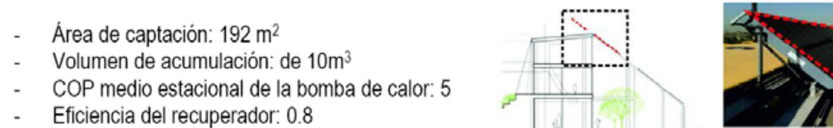
Análisis de mejora de la Envuelta térmica

Elementos Constructivos de la zona exterior	Valor edificio objeto	Valor edificio de referencia
Cerramientos exteriores	0.44 W/(m²K)	0.86 W/(m²K)
Cubierta horizontal	0.45 W/(m²K)	0.49 W/(m²K)
Cubierta inclinada	0.45 W/(m²K)	0.49 W/(m²K)
Ventanas (U)	1.50 W/(m²K)	3.00 W/(m²K)
Ventanas factor solar (g)	0.58	0.61
Ventanas Factor sombra (invierno_verano)	1.00 _ 0.30	1.00 _ 1.00
Ventanas factor solar modificado (Fsm)	0.58_ 0.17	0.61

Análisis del sistema de Climatización

El funcionamiento de los equipos de bombas de calor agua/agua responde al siguiente esquema:

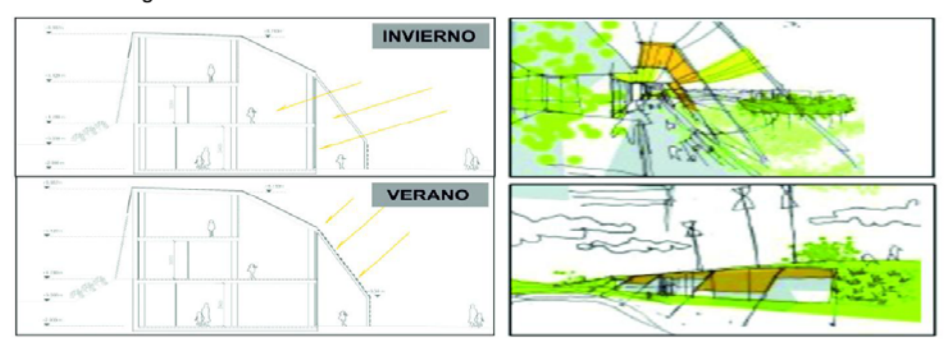
- Área de captación: 192 m²
- Volumen de acumulación: de 10m³
- COP medio estacional de la bomba de calor: 5
- Eficiencia del recuperador: 0.8



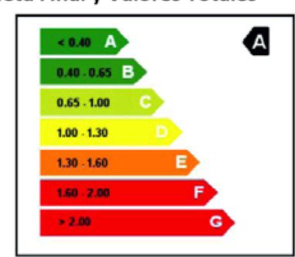


El condensador de las bombas de calor alimenta unidades terminales de suelo radiante.
El evaporador de la bomba de calor se alimenta de agua procedente de un depósito (o aljibe) que a su vez está calentado mediante paneles solares en cubierta y por el agua caliente procedente de un recuperador de calor del aire de extracción.

Eficiencia Energética de la Iluminación



Etiqueta Final y Valores Totales



Concepto	Edif. Objeto	Edif. Referencia
Energía Final (kWh/año)	118074.4	502038.3
Energía Final (kWh/(m²año))	60.9	258.8
En. Primaria (kWh/año)	261932.3	772777.9
En. Primaria (kWh/(m²año))	135.0	398.4
Emisiones (kg CO2/año)	**63935.6**	**198807.0**
Emisiones (kg CO2/(m²año))	**33.0**	**102.5**

Fig. 39. Análisis de Ecodiseño y Calificación Energética final del Proyecto.

3.2. Concurso de Edificio de Viviendas para Jóvenes Artistas. Córdoba. 2011

Estudio de Arquitectura CC60. Madrid.

El estudio de arquitectura CC60 se presentó al concurso mencionado con la colaboración de un nutrido grupo de especialistas para la definición de un edificio de viviendas para jóvenes artistas en Córdoba.

Al ser un concurso no ganado, no se ha desarrollado el proyecto básico ni de ejecución, y por tanto, sólo aparecen los datos de los estudios específicos para la propuesta.

Se pretende obtener un edificio de altas prestaciones energéticas sin necesidad de sistemas de climatización, es decir, un edificio bioclimático.

Para la ubicación de los espacios destinados a vivienda se ha buscado una configuración que permita el mejor funcionamiento bioclimático del edificio. Todas las viviendas están orientadas al Sur, tienen ventilación cruzada y se ha buscado una envolvente optimizada para el menor intercambio de energía tanto en invierno como en verano.

Estas soluciones pasivas, permiten alcanzar una calificación energética A, con un consumo mínimo de energía en instalaciones de climatización que se utilizarían únicamente como apoyo.

Sin sistemas de climatización se obtiene también Alta Calificación gracias al diseño, en este caso una Calificación Energética B.

Las principales estrategias de climatización pasiva que se proponen para la vivienda son:

- Ventanas captoras orientadas al Sur e inercia elevada en forjados, de manera que se alcance estabilidad térmica a lo largo del año.
- Envolvente optimizada con niveles de transmitancia térmica reducida.
- Control de las infiltraciones y reducción de los puentes térmicos mediante el uso de un sistema de aislamiento por el exterior.
- Protección solar de huecos.
- Sistema de ventilación nocturna controlada en verano.
- Sistema de riego por goteo en cubierta para reducir la temperatura en los meses estivales.

• *Envolvente Térmica*

Todas las viviendas buscan el beneficio del confort térmico anual sin sistemas de climatización mediante una envolvente optimizada para el menor intercambio de energía, tanto en invierno como en verano, por lo que la inversión inicial es mínima. Estas soluciones pasivas, permiten alcanzar una Calificación Energética B, logrando un ahorro energético del 53% respecto al mínimo marcado por el actual Código Técnico de la Edificación.

Los valores de la envolvente obtenidos para que, sin sistemas de climatización, se obtenga Calificación energética B deben ser:

Muros

U Muros = 0,39 W/m^{2}K U_M referencia = 1,07 W/m^{2}K
Desfase térmico: 8,6 horas
Amortiguación térmica: 89,1%

Huecos

U Huecos =1,60 W/m^{2}K U_H referencia = 5,70 W/m^{2}K
Factor solar 0,55   Fsolar referencia = 1,00

Suelos

U Suelo = 0,50 W/m^{2}K U_S referencia = 0,68 W/m^{2}K
Desfase térmico: 13 horas
Amortiguación térmica: 96,9%

Cubierta

U Cubierta = 0,30 W/m2K U_S referencia = 0,59 W/m^{2}K
Desfase térmico: 13 horas
Amortiguación térmica: 95%

• *Iluminación y confort térmico*

Sistemas de control solar basados en voladizos superiores a las ventanas orientadas al Sur. Mejoran la habitabilidad en el interior de las estancias por reducir las demandas energéticas de refrigeración y calefacción, por lo que mejoran el confort térmico de las salas.

Control de la Iluminación mediante una correcta sectorización posibilitando un uso más racional y reduciendo el consumo total eléctrico, tan penalizado en los Balances Energéticos.

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS PARA CONCURSO DE EDIFICIO DE VIVIENDAS PARA JÓVENES ARTISTAS EN CORDOBA [CC60]

aicia

	Limitacion de la demanda	Eficiencia Energética	Energías Renovables
Climatizacion: Calefacción y Refrigeración	Diseño medioambiental del edificio: Compacidad Optimización de niveles de aislamiento Control solar	Diseño bioclimático del edificio sin necesidad de sistemas de climatización	Produccion solar de ACS
Ventilación	Ventilación nocturna Control de estanqueidad durante la ejecución	Minimización de infiltración no deseadas	Free cooling por Ventilación nocturna

Reciclabilidad
Vida Útil
Eficiencia Energética

Fig. 40. Estudio de alternativas energéticas para Concurso de edificio de viviendas para jóvenes artistas. Estudio de Arquitectura CC60, Córdoba. 2011

4. Conclusiones

Con el fin de que para diciembre de 2020 todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo, se está elaborando una hoja de ruta que conduzca de manera paulatina a esta exigencia.

Se trata de combinar ahorros de energía entre dos situaciones del Código Técnico de la Edificación con la eliminación de la posibilidad de que los edificios alcancen las peores clases de eficiencia.

En la figura siguiente (Fig. 41) se muestra en línea continua la distribución en la escala de calificación de la demanda de calefacción de los edificios de viviendas unifamiliares en Madrid, suponiendo un estricto cumplimiento del CTE-HE 2006, y en curva discontinua el resultado de una doble exigencia:

- Ahorro de un 30% frente a la demanda exigible según CTE-HE 2006.
- Aceptación de edificios con clase de eficiencia C o superior.

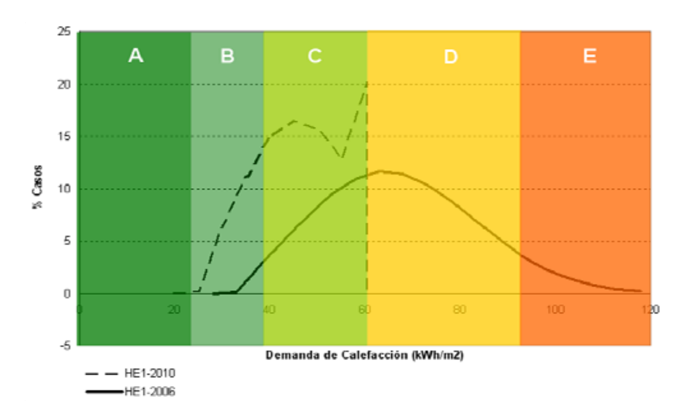


Fig. 41. Exigencia en demanda de calefacción. En curva continua CTE-HE 2006 y en curva discontinua CTE-HE 2011.

Aunque aún no está definido lo que significa un edificio de consumo de energía casi nulo, el esquema anterior es aplicable con independencia de la definición.

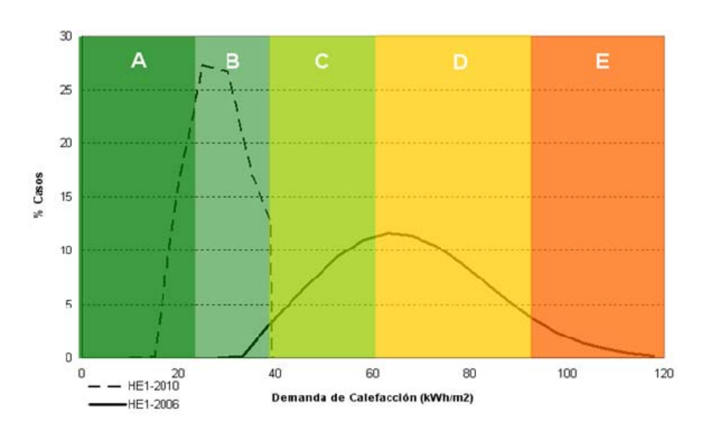


Fig. 42. Exigencia en demanda de calefacción. En curva continua CTE-HE 2006 y en curva discontinua CTE-HE 2015.

Por ejemplo, si aceptamos que la clase de eficiencia A es una cota mínima de lo que significa un edificio de consumo de energía casi nulo, es posible visualizar una hoja de ruta de exigencias dobles (en ahorro y en clase de eficiencia) con un hito intermedio en 2015 y llegada en 2020. La figura anterior (Fig. 42), ilustra esta situación intermedia.

4.1. Argumentos para obtener edificios de alta eficiencia energética (clase A)

- Edificios corporativos de entidades que tienen actividades relacionadas con las energías renovables, la eficiencia energética, la sostenibilidad, etc.
- Edificios construidos por constructores, inmobiliarias, promotores, estudios, etc. que abogan por la sostenibilidad como uno de sus elementos de imagen de marca.
- El sector público cuyos edificios tienen que ser ejemplares en este sentido.
- Edificios financiados con capital público.
- Edificios que quieren acogerse a políticas de subvención en eficiencia energética.
- Por obligación todos los edificios nuevos a partir de 2018 (edificios públicos) ó 2020 (resto).

4.2. ¿Cómo se obtienen estos edificios?

Conseguir estos edificios dentro de un contexto de rentabilidad económica no es tarea fácil y supone la revisión y sobre todo, la integración de numerosos aspectos vinculados a la energética edificatoria.

Estos aspectos abarcan:

- Buen diseño arquitectónico del edificio.
- Alta calidad de los componentes de la envolvente.
- Inclusión en el mismo de fachadas y cubiertas inteligentes.
- La utilización de técnicas bioclimáticas que utilizan las fuentes y sumideros medioambientales.
- Equipos y sistemas innovadores apoyados por energías renovables.
- Soluciones integrales de domótica que aglutinen y adapten todos estos conceptos a las necesidades específicas de cada edificio.

4.3. Instrumentos institucionales de apoyo a la eficiencia energética

- Plan de acción de ahorro y eficiencia energética de edificios (PAE4 2008-2012).
- Plan de ahorro y eficiencia energética en edificios de la administración general del estado.
- Plan de contratación pública verde.
- Estrategia Española sobre cambio climático y energías limpias (Nov. 2007).
- Plan de energías renovables (2005-2010).
- Estrategia española de desarrollo sostenible.

4.4. Resumen: conclusión final

- Existe la necesidad urgente de actuación.
- Existe la concienciación ciudadana de dicha necesidad.
- Existe el marco legislativo que clarifica, objetiviza y promueve la calidad energética y medioambiental de los edificios.
- Existen las herramientas para la implementación efectiva del marco legislativo.
- Existen los instrumentos institucionales de apoyo.
- Estamos obligados a asumir el compromiso derivado del dilema energético medioambiental de nuestra época.
- La capacidad de adaptación a este nuevo contexto supondrá un reto y una nueva oportunidad de negocio para empresas tanto de los sectores tradicionales de la construcción como otras emergentes vinculadas a las nuevas tecnologías.

Glosario

Demanda energética: es la energía necesaria para mantener en el interior del edificio unas condiciones de confort definidas reglamentariamente en función del uso del edificio y de la zona climática en la que se ubique. Se compone de la demanda energética de calefacción, correspondiente a los meses de la temporada de calefacción y de refrigeración respectivamente.
Envuelta térmica del edificio: compuesta por todos los cerramientos que limitan espacios habitables con el ambiente exterior (aire o terreno u otro edificio) y por todas las particiones interiores que limitan los espacios habitables con los espacios no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior.
Catálogo base: aumento de aislamiento de cerramientos opacos, mejora de calidad de huecos y mejora de puentes térmicos, excepto los de contorno de huecos.
Catálogo ampliado: el catálogo base más mejora de puentes térmicos de contorno de huecos, mejora de estanqueidad de opacos y caudal variable de ventilación.
Catálogo reducido: sólo aumento de aislamiento de cerramientos opacos y mejora de calidad de huecos, es decir, el mismo catálogo utilizado en la CTE-HE 2006.
Zona climática: en esta Sección se definen 12 zonas climáticas en función de las severidades climáticas de invierno (A, B, C, D, E) y verano (1, 2, 3, 4) de la localidad en cuestión. Se excluyen las combinaciones imposibles para la climatología española.
Transmitancia térmica: es el flujo de calor, en régimen estacionario, dividido por el área y por la diferencia de temperaturas de los medios situados a cada lado del elemento que se considera.
Factor de sombra: es la fracción de la radiación incidente en un hueco que no es bloqueada por la presencia de obstáculos de fachada tales como retranqueos, voladizos, toldos, salientes laterales u otros.
Factor solar: es el cociente entre la radiación solar a incidencia normal que se introduce en el edificio a través del acristalamiento y la que se introduciría si el acristalamiento se sustituyese por un hueco perfectamente transparente.
Indicador de eficiencia energética (IEE): se define como el ratio entre un Indicador de comportamiento energético correspondiente al edificio objeto y un valor de referencia consistente.
Muro parietodinámico: cerramiento que aprovecha la energía solar para el precalentamiento del aire exterior de ventilación. Generalmente está formado por una hoja interior de fábrica, una cámara de aire y una hoja exterior acristalada o metálica que absorbe la radiación solar. La circulación del aire puede ser natural (termosifón) o forzada.
Muro Trombe: cerramiento que aprovecha la energía solar para el calentamiento por recirculación del aire interior del edificio. Generalmente está formado por una hoja interior de fábrica, una cámara de aire y un acristalamiento exterior. La circulación del aire puede ser natural (termosifón) o forzada. También se denomina muro solar ventilado.
Puente térmico: se consideran puentes térmicos las zonas de la envolvente del edificio en las que se evidencia una variación de la uniformidad de la construcción, ya sea por un cambio del espesor del cerramiento, de los materiales empleados, por penetración de elementos constructivos con diferente conductividad, etc., lo que conlleva necesariamente una minoración de la resistencia térmica respecto al resto de los cerramientos. Los puentes térmicos son partes sensibles de los edificios donde aumenta la posibilidad de producción de condensaciones superficiales, en la situación de invierno o épocas frías.

Bibliografía

[1] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Real Decreto 47/2007 por el que se aprueba el Procedimiento para la Calificación de Eficiencia Energética de Edificios.
[2] DIRECTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios.
[3] DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)
[4] Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo (BOE 28 de marzo de 2006). "Código Técnico de la Edificación". Ministerio de Vivienda.
[5] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Documento Reconocido "Opción Simplificada para la Calificación Energética de Edificios de Viviendas Ce2".
[6] Salmerón, R. "Procedimientos para el diseño de edificación de alta eficiencia energética para las tipologías arquitectónicas básicas". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Sevilla, 2011.
[7] A. Ruiz-Pardo, Ahorro energético mediante el uso de elementos de doble envolvente transparente-opaco, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla, 2008.

Bombas de calor. Tecnología renovable y energéticamente eficiente en edificios

Heat Pumps. A Renewable and Energy-Efficient Technology in Buildings

Fco. Javier Rey [a*], Cristina Cano [b], Sergio L. González [c]

[a] *Catedrático,* [b] *Dra. Ingeniero Industrial,* [c] *Ingeniero Industrial. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid*

Resumen

Una de las tecnologías que consigue una elevada eficiencia y ahorro energético en la climatización de edificios son las denominadas Bombas de calor. Se trata de una tecnología amigable con el medio ambiente por utilizar energías renovables para su funcionamiento. Las Bombas de calor aparecen en las Directivas Europeas sobre el uso de Energías renovables (RES), Eficiencia energética en edificios (EPBD) y Productos relativos a la energía (ErP). Además, en la Directiva RES, se reconoce a la energía empleada por las Bombas de calor, procedente del aire, el agua y la tierra, como fuente de energía renovable. En este capítulo se describirá la tecnología, eficiencia y tipos de bombas de calor aplicadas a edificios para calefacción y refrigeración. Finalmente se mostrará un ejemplo práctico de un proyecto real de una Bomba de calor geotérmica.

Palabras clave: Bomba de Calor, Climatización, Eficiencia Energética, Energía Renovable, Geotermia

Abstract

One of the technologies that achieves high efficiency and energy savings in HVAC (heating, ventilation and air conditioning) systems of buildings is called heat pump. This is an environmentally friendly technology because of the use of renewable energies for its operation. Heat pumps appear in the European Directives on the use of Renewable Energy (RES), Energy Performance of Buildings (EPBD) and Energy related products (ErP). In addition, the energy used by heat pumps that comes from air, water and earth is recognized as a renewable energy sources in the RES Directive. Technology, efficiency and different kinds of heat pumps applied in buildings for heating and cooling will be described in this chapter. Finally, a practical example of a geothermal heat pump real project for a dwelling will be shown.

Keywords: Heat Pump, HVAC, Energy Efficiency, Renewable Energy, Geothermal

1. Introducción

La sociedad de consumo en la que vivimos, necesita de un alto consumo energético para mantener su nivel de vida y de confort. Actualmente, el reto se basa en buscar un desarrollo sostenible, manteniendo el nivel de actividad, de transformación y de progreso, pero ajustando las necesidades a los recursos existentes. Se trata de evitar el derroche energético y reducir las emisiones de gases con efecto invernadero.

Esta creciente preocupación por la conservación del medioambiente, y en particular por el cambio climático, está llevando a los Gobiernos e Instituciones de todo el mundo a la búsqueda de soluciones, consecuencia de esa preocupación, es el Protocolo de Kioto, que significa el establecimiento por primera vez de compromisos concretos para todos los países industrializados, en particular en lo referente a los objetivos de reducción de emisiones de gases con efecto invernadero.

Los edificios residenciales, como son las viviendas, y los no residenciales o de servicios, absorben más del 40%

* rey@eis.uva.es

Citar como: Rey Martínez, F.J., Cano Herrador, C., González González, S.L. (2012). Bombas de calor. Tecnología renovable y energéticamente eficiente en edificios. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 207 - 223). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

del consumo final de energía en la Comunidad Europea y se encuentra en fase de expansión, tendencia que previsiblemente hará aumentar el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de dióxido de carbono.

Los edificios tienen una gran incidencia en el consumo de energía a largo plazo, por lo que todos los edificios nuevos deberían cumplir unos requisitos mínimos de eficiencia energética adaptados a las condiciones climáticas locales. A este respecto, se deben orientar las buenas prácticas para un uso óptimo de los elementos relativos a la mejora de la eficiencia energética. Éstos y algunos aspectos más han determinado la adopción de la directiva 2002/91 sobre eficiencia energética (EPBD), que se ha mejorado y refundido en la Directiva de 2010 "Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) Recast".

El fomento de la eficiencia energética constituye una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para cumplir lo dispuesto en el Protocolo de Kyoto, y debe estar presente en todas las medidas que se adopten con el fin de dar cumplimiento a nuevos compromisos.

Una de las tecnologías empleadas para la climatización de edificios, que consigue una elevada eficiencia y ahorro energético, son las denominadas Bombas de calor.

Se trata de una tecnología amigable con el medio ambiente por utilizar energías renovables para su funcionamiento. Las Bombas de calor aparecen en las Directivas Europeas sobre el uso de Energías renovables RES, Eficiencia energética en edificios EPBD y Productos relacionados con la energía ErP.

Además, en la Directiva RES, se reconoce a la energía empleada por las Bombas de calor, procedente del aire, el agua y la tierra, como fuentes de energía renovables.

La Bomba de calor, recogiendo las consideraciones de las Directivas anteriores, podemos definirla como una máquina, equipo o instalación que usa el calor de fuentes naturales de energías renovables, aerotérmicas, geotérmicas e hidrotérmicas, o de procesos no naturales de recuperación de calor del aire o del agua, transfiriéndolo a las aplicaciones del edificio a través de un ciclo termodinámico desde una fuente externa a baja temperatura a otra interna de alta temperatura.

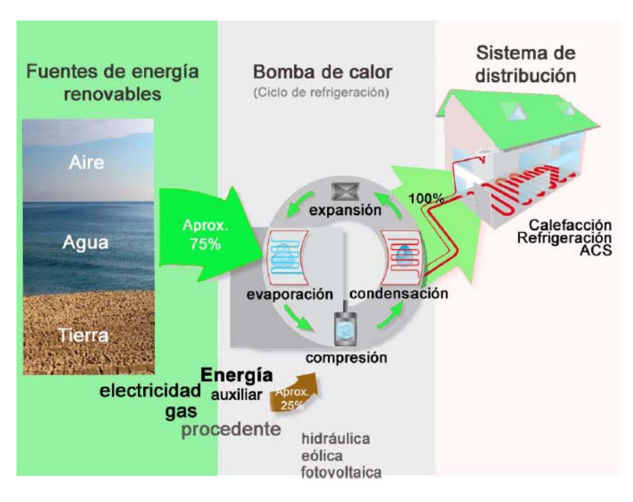


Fig. 1. Elementos intervinientes en el sistema de Bomba de Calor.

Para que el ciclo termodinámico se produzca se debe alimentar con energía primaria (electricidad, gas). En condiciones climáticas extremas se requiere un apoyo mediante un equipo de calefacción para compensar la reducción del flujo de calor de la Bomba de calor. Sólo se considerarán las Bombas de calor como fuente de energía renovable, y se podrá contabilizar ésta, en aquellas en las que el balance neto entre la energía que produce la Bomba y la que requiere para su funcionamiento es significativamente positivo [1].

La Directiva 2009/28/CE de la Comisión Europea, conocida como Directiva RES, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, establece que la energía aerotérmica, geotérmica e hidrotérmica capturada por las Bombas de calor se tendrá en cuenta a efectos del cálculo de la cuota de energía procedente de fuentes renovables, siempre que la producción final de energía supere de forma significativa el consumo de energía primaria necesaria para impulsar la bomba de calor. La cantidad de calor que se ha de considerar como energía procedente de fuentes renovables a efectos de la presente Directiva se calculará de conformidad con la metodología establecida en el anexo VII de esta Directiva, que indica el balance energético de las Bombas de calor.

La cantidad de energía aerotérmica, geotérmica o hidrotérmica capturada por bombas de calor que debe considerarse energía procedente de fuentes renovables a los efectos de la presente Directiva, ERES, se calculará de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$ERES = Q_{usable} \cdot (1 - 1/SPF)$$

Siendo:

- Q_{usable} = el calor útil total estimado proporcionado por bombas de calor conformes a los criterios mencionados en el artículo 5, apartado 4 de la Directiva, aplicada como sigue: solo se tendrán en cuenta las bombas de calor para las que $SPF > 1.15 * 1/\eta$
- SPF = el factor de rendimiento medio estacional estimativo para dichas bombas de calor, η el cociente entre la producción total bruta de electricidad y el consumo primario de energía para la producción de electricidad, y se calculará como una media de la UE basada en datos de Eurostat [2].

Antes del 1 de enero de 2013, la Comisión establecerá las directrices para que los Estados miembros estimen los valores de Q_{usable} y SPF para las diferentes tecnologías y aplicaciones de las bombas de calor, teniendo en cuenta las diferencias de las condiciones climáticas, especialmente en climas muy fríos.

En la figura 2 en la columna 2 muestra la contribución energética final renovable para una Bomba de calor renovable estándar con un SPF = 4 basada en un η = 0,4.

Si tenemos en cuenta el mix eléctrico con una contribución de electricidad renovable esto afectará al SPF reduciéndole debido a un mayor rendimiento eléctrico, por ejemplo con un SPF de 2,875 de una Bomba de calor como se observa en la columna 3 esta permite un 64% de energía renovable final.

Los cálculos de EUROSTAT para 2007 eran de un $\eta = 0,438$ consiguiendo un SPF = 2,63 como mínimo valor de la Bomba de calor en la contribución energética final renovable.

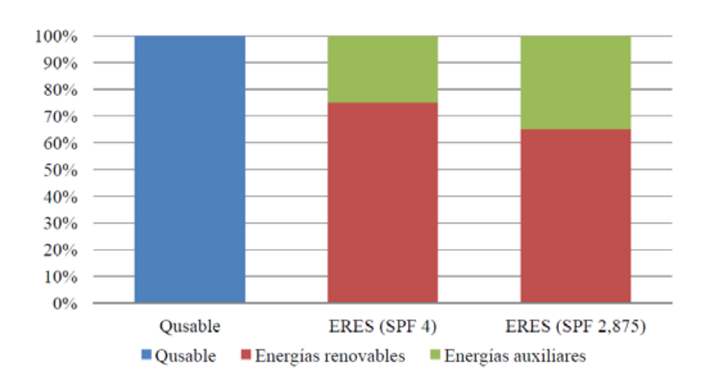


Fig. 2. Cuota de energía renovable y auxiliar en una Bomba de Calor con un eta = 0,4. Fuente: EUROSTAT.

2. Tecnología de las Bombas de calor

Una bomba de calor es una máquina termodinámica formada por un circuito frigorífico clásico (compresor, condensador, sistema de expansión y evaporador, Figura 3) del que se aprovecha la energía calorífica cedida por el condensador (aire caliente o agua caliente que sale del condensador). También puede operar de modo reversible y en ese caso permite además absorber la energía calorífica del foco frío a través del evaporador, produciendo una refrigeración [3].

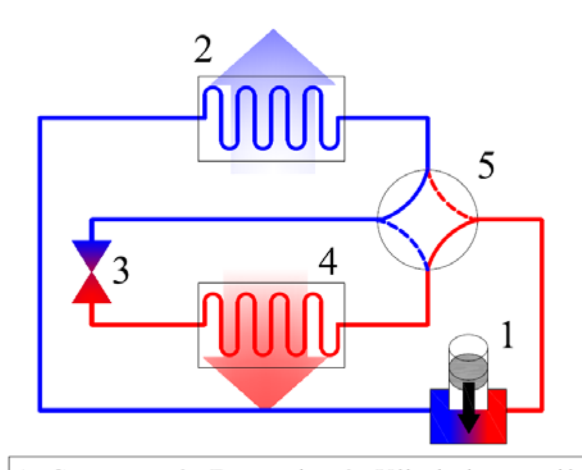


Fig. 3. Componentes de una Bomba de calor reversible.

2.1. Elementos componentes de una Bomba de calor

Los principales elementos que componen una bomba de calor por compresión mecánica son:

- *Compresor*

Es el elemento mecánico más complicado y delicado de la instalación, siendo objeto de inspecciones y verificaciones sistemáticas. Además, el compresor es el único elemento de la máquina que necesita para su funcionamiento consumir energía mecánica.

Este dispositivo permite aumentar la presión del refrigerante en estado gaseoso y normalmente sobrecalentado, procedente del evaporador, hasta una presión que favorece el paso de estado gas a líquido en el condensador, cediendo calor al entorno. Hay que tener en cuenta que no se puede aumentar la presión sin que además aumente la temperatura, aunque el compresor fuera idealmente isentrópico (el compresor en realidad no es isentrópico, parte del trabajo lo disipa en forma de calor).

- *Condensador*

Un condensador es un intercambiador de calor en el que el refrigerante que proviene del compresor en estado de vapor sobrecalentado, a temperatura elevada, cede calor a un medio que puede ser aire o agua. Este enfriamiento produce la condensación del fluido frigorífico. La transferencia de calor se favorece mediante el uso de tubos aleteados, o ventiladores si la refrigeración se realiza por aire. El condensador disipa la energía que recoge el evaporador, y además la componente térmica del trabajo del compresor.

Los condensadores más utilizados cuando se dispone de agua de refrigeración son de placas o son intercambiadores de carcasa y tubos. En este último caso, si el fluido que condensa va por el lado de la carcasa se denomina condensadores inundados, y son los más utilizados en grandes equipos.

- *Dispositivo de expansión*

Es el elemento que separa el lado de alta presión del de baja presión. Su finalidad es doble, regular el flujo de refrigerante hacia el evaporador y reducir la presión del líquido refrigerante de forma isoentálpica (sin variar la entalpia del refrigerante, la capacidad de intercambiar calor).

La válvula de expansión termostática es el dispositivo más utilizado, pues varía el flujo de refrigerante que entra al evaporador con la temperatura del refrigerante en estado gaseoso a la salida del mismo. Además protege al compresor de la entrada de líquido, pues permite mantener constante el grado de recalentamiento de gas a la salida del evaporador.

La regulación se realiza por la temperatura de recalentamiento del gas que sale del evaporador, mediante un equilibrio de fuerzas. Las válvulas pueden ser de

regulación interna, teniendo en cuenta la presión del bulbo y la presión a la entrada del evaporador, o externa, mediante la presión del bulbo y la presión a la salida del evaporador.

• *Evaporador*

El evaporador es el elemento en el que se produce el efecto frigorífico por ebullición del fluido refrigerante procedente del sistema de expansión. Se trata de un intercambiador de calor, en donde el refrigerante que después de la expansión se encuentra como vapor húmedo, absorbe calor del medio, ya sea aire, agua o cualquier otra sustancia, para cambiar de estado hasta que todo él se encuentre como gas. Cuanto mayor sea la fracción líquida del vapor húmedo mayor será el efecto frigorífico. Si es un compuesto puro o una mezcla azeotrópica (varios componentes que no se pueden separar por destilación, cambian de fase a las mismas temperaturas), cuando se produce el cambio de fase, la temperatura del refrigerante se mantiene prácticamente constante a lo largo de toda la superficie de intercambio.

La capacidad del evaporador aumenta siempre que la diferencia de temperatura entre el medio a enfriar y el refrigerante aumenta, lo que se consigue disminuyendo la presión de evaporación o aumentando la temperatura del medio a enfriar. Por tanto, cuanto más baja sea la temperatura de evaporación y más alta la temperatura en el fluido, mayor será la potencia frigorífica.

La capacidad del evaporador aumenta siempre que la diferencia entre la temperatura del evaporador y la del condensador disminuye.

Atendiendo a diferentes características los evaporadores pueden clasificarse de varias maneras. Por ejemplo, según el tipo de funcionamiento, pueden ser evaporadores de expansión seca o directa, o evaporadores inundados. Atendiendo al tipo de construcción se tienen evaporadores de carcasa y tubos, de placas y evaporadores con aletas.

• *Accesorios y elementos de seguridad y control*

Los elementos principales de una bomba de calor pueden ir acompañados de otros componentes que sin ser elementos imprescindibles del circuito frigorífico, deben añadirse para aumentar la fiabilidad del equipo, la facilidad de mantenimiento, servicio, así como una mayor calidad del mismo. Estos accesorios hacen que los componentes fundamentales del circuito frigorífico tengan óptima efectividad y mejorando su rendimiento e incrementando su vida útil.

Los dispositivos de seguridad y control paran el compresor en aquellos casos en que se esté trabajando fuera de las condiciones permitidas, evitando así que se vea dañado.

• *Refrigerantes*

Un refrigerante en general es un fluido que actúa como medio de transmisión de calor, absorbiendo el calor del evaporador a baja temperatura y cediéndolo al condensador a alta temperatura.

Los fluidos refrigerantes deben tener ciertas propiedades termodinámicas, físicas, químicas, así como condicionantes en el ámbito de la seguridad, que les hacen recomendables para diferentes aplicaciones.

En el caso de los sistemas de bomba de calor, habrá que escoger aquellos refrigerantes que sean capaces de operar en las condiciones de temperatura utilizadas en climatización, determinadas normalmente por las condiciones de diseño exteriores.

Los fluidos refrigerantes se clasifican de distintas formas atendiendo a diferentes criterios.

R-410A es el refrigerante que está comenzando a sustituir al R-22 en equipos tipo splits (partidos). Es un refrigerante zeotrópico que contiene un 50% de R-32 (Difluorometano) y un 50% de R-125 (Pentafluoroetano). El único aceite compatible con el R-410A es el denominado POE, que como es muy higroscópico absorbe mucha humedad y se degrada fácilmente por lo que se han de tomar las debidas precauciones.

3. Eficiencia (COP) de una Bomba de Calor

Se entiende por ciclo todo proceso en el cual la sustancia que evoluciona, después de sufrir una serie de transformaciones, vuelve a recuperar su estado inicial, posibilitando así la repetición del ciclo.

Nosotros vamos a estudiar el ciclo simple de compresión de vapor también llamado ciclo de refrigeración saturado simple, es el inverso del ciclo de Rankine, por lo que el fluido recorre el ciclo en sentido contrario a como lo haría en una máquina térmica funcionando como ciclo Rankine.

El esquema de funcionamiento y el diagrama P-h (Presión- entalpía) del denominado ciclo simple se han representado en la figuras 4 y 5

En la figura 4 se considera el ciclo simple de compresión de vapor. El punto 3, representa la aspiración o salida del evaporador (estado de vapor saturado); el punto 4, la salida del compresor (estado de vapor recalentado); el punto 1, la salida del condensador (estado de líquido saturado) y finalmente el 2, la entrada del evaporador.

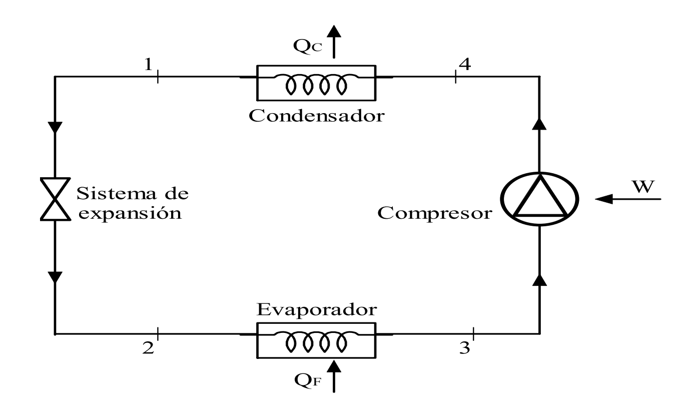


Fig. 4. Esquema de funcionamiento del ciclo simple por compresión de vapor.



A la eficiencia de las máquinas frigoríficas y de las bombas de calor lo denominaremos de forma abreviada COP. Se llama COP o coeficiente de prestaciones (coefficient of performance) del ciclo de una máquina frigorífica a la relación entre la potencia frigorífica desarrollada por la máquina y la potencia consumida:

$$COP_{REF} = \frac{Efecto\ \ útil}{Trabajo\ \ aportado} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F}$$

Donde Q_C, es el calor cedido en el foco caliente y Q_F, el calor absorbido en el foco frío.

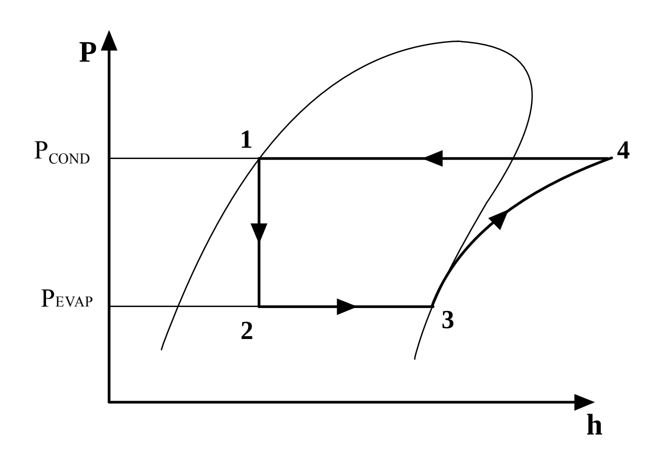


Fig. 5. Diagrama P-h del ciclo simple por compresión de vapor.

Para el ciclo inverso de Carnot (ciclo teórico) el COP máximo ($COP_{REF\ IDEAL}$) viene dado por la siguiente expresión:

$$COP_{REF\ IDEAL} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} = \frac{T_F \cdot (s_2 - s_1)}{(T_C - T_F) \cdot (s_2 - s_1)} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Donde T_C, es temperatura del foco caliente y T_F la del foco frío.

De este resultado se deduce que:

El COP para el caso del ciclo inverso de Carnot, $COP_{REF\ IDEAL}$, sólo depende de las temperaturas de los focos.

Será tanto más elevado cuanto menor sea la diferencia entre las dos temperaturas, T_C y T_F.

El COP será mayor cuanta más alta sea la temperatura del foco frío T_F.

Según el segundo Principio de la Termodinámica, ninguna máquina frigorífica puede tener un COP superior al establecido por el ciclo inverso de Carnot, $COP_{REF} \leq COP_{REF\ \ IDEAL}$.

Por tanto, la producción de frío será tanto más difícil de conseguir cuanto menor sea la temperatura a la que se debe producir. También es importante observar que la disipación de calor del condensador en una máquina frigorífica, será peor en un ambiente cálido que en uno frío [4].

La relación entre el COP de una máquina frigorífica determinada y el de una de Carnot que operase entre los mismos focos, se denomina grado de reversibilidad o coeficiente económico de la instalación. El grado de reversibilidad expresa, en tanto por uno, la aproximación del comportamiento de una máquina dada al modelo ideal, constituido por la máquina frigorífica totalmente reversible.

El sistema de climatización con bomba de calor permite aprovechar la energía disipada en el foco caliente, suma del calor extraído del foco frío y del trabajo aportado para hacer el proceso posible. En esta situación se define el COP del ciclo de calefacción para una bomba de calor (COP_{CALEF}) como el cociente entre la energía térmica útil y el trabajo utilizado. El COP utilizando la bomba de calor como calefacción será:

$$COP_{CALEF} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F}$$

Al igual que ocurría en el caso anterior, en los procesos reales siempre se cumple que:

$$COP_{CALEF} \leq COP_{CALEF\ IDEAL}$$

Donde el $COP_{CALEF\ IDEAL}$, se establece según el ciclo inverso de Carnot como:

$$COP_{CALEF\ IDEAL} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Por lo tanto, el COP de una bomba de calor no es constante, sino que depende de la temperatura que tiene el ambiente exterior T_F, y de la temperatura de confort interior en el local, que será el foco caliente a T_C, cuando trabaja en modo calefacción.

Una de las ventajas que presentan los sistemas de bomba de calor es la posibilidad de trabajar como máquina frigorífica para producir un fluido frío (aire, agua o el propio refrigerante del circuito frigorífico) que sirva para refrigerar los locales en verano, es cuando la bomba de calor opera en "modo refrigeración". En este caso, los COP_{REF} que pueden definirse son:

$$COP_{REF} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} \quad \text{y}$$

$$COP_{REF\ IDEAL} = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

Al igual que ocurría en modo calefacción, para tener un COP alto en época estival, COP_{REF}, la temperatura ambiente, que en esta situación será la del foco caliente (T_C) debe ser lo más baja posible, es decir, el COP será más alto para una temperatura ambiente de 20 ºC que para el caso de una temperatura ambiente de 40 ºC, y al contrario con la temperatura de confort del local, cuanto mayor sea T_F mejores prestaciones proporcionará la máquina.

Una bomba de calor de tipo aire-aire puede tener un COP_{CALEF} de 3 e incluso mayor, con una temperatura exterior adecuada si hay una gestión de la energía consumida por el compresor eficaz y un adecuado control electrónico del proceso de generación, pero puede disminuir el COP_{CALEF} a valores de 1,5 con temperaturas exteriores bajas (por ejemplo -18 ºC) y sin sistema de control. En este caso sólo resultaría económica si se hace trabajar al sistema de compresión a esta temperatura en combinación con un sistema auxiliar de calefacción y se compara con los sistemas de calefacción directa por efecto Joule, pero sería desfavorable cuando esta comparación se realizara con un sistema de calefacción convencional que para producir calor utilizase un proceso de combustión, normalmente de un combustible fósil.

Para dimensionar la bomba de calor, en la práctica, se efectúa tomando como base el empleo más común que se vaya a dar a la bomba de calor. Para el caso de tener la bomba de calor destinada mayoritariamente a la refrigeración del local a climatizar, el dimensionado de la bomba de calor se hará en base a las exigencias frigoríficas en la época estival, subsanando con resistencias eléctricas la eventual insuficiencia en cuanto a aportación de calor al ambiente se refiere que pudiera tener lugar durante el invierno [5].

Para el caso de que el local esté situado en un lugar en el que la mayor parte del año se necesite calefactar, el dimensionado se hará en base a las exigencias caloríficas en la época invernal. Un dimensionado correcto evita un excesivo uso de las resistencias. Estas resistencias tienen también una función de complemento para el caso de avería de la bomba de calor.

Para una bomba de calor agua-aire, normalmente, no es necesaria la aportación de calor auxiliar, ya que la fuente de calor, el agua normalmente de un pozo, se mantiene a una temperatura prácticamente constante, pudiendo incluso conseguir COPs del orden de 4.

Además, hay que tener en cuenta que el COP del ciclo de calefacción de la bomba de calor es superior en una unidad al COP del mismo ciclo funcionando en refrigeración:

$$COP_{CALEF} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} = \frac{\dot{Q}_F + \left(\dot{Q}_C - \dot{Q}_F\right)}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} =$$

$$= \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} + 1 = COP_{REF} + 1$$

El COP práctico es la forma empírica de calcular el COP real de calefacción.

El COP teórico es una aproximación que considera que el fluido refrigerante se encuentra a la misma temperatura que las fuentes térmicas con las que intercambia calor. Esto no es posible en realidad, el fluido al eliminar calor de la fuente fría está a temperatura inferior que ésta, y lo mismo ocurre con el medio que se pretende calentar, donde el fluido debe estar más caliente que el foco caliente al que cede calor.

Además, el paso del fluido desde la fuente caliente a la fría y viceversa no se realiza en condiciones isentrópicas, siendo los procesos irreversibles y no perfectamente adiabáticos. En consecuencia, hay que corregir el COP teórico.

El COP práctico puede calcularse con la fórmula siguiente:

$$COP_{práctico} = \alpha \cdot \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$$

El COP práctico depende del coeficiente de rendimiento α y de las temperaturas del fluido (condensador-evaporador). El parámetro α o coeficiente de rendimiento tiene en cuenta que el ciclo real no se desarrolla en condiciones ideales. Este coeficiente oscila entre 0,3 en máquinas pequeñas y 0,65 en las de gran potencia.

T_{evap} y T_{cond} son respectivamente las temperaturas absolutas de evaporación y condensación del fluido refrigerante. Para que la transmisión de calor entre el fluido refrigerante y un foco frío tenga lugar, es necesario que T_{evap} sea inferior a T_F, y para que el fluido refrigerante ceda calor al foco caliente, T_{cond} debe ser superior a la temperatura del foco caliente T_C.

Las condiciones del foco caliente y del foco frío varían a lo largo del año, y en consecuencia las temperaturas a las que debe trabajar el fluido también deben variar. Por esta razón es posible que haya que aportar al sistema energías adicionales a la del compresor en los momentos más desfavorables. A la hora de estudiar la viabilidad e interés de una bomba de calor en una determinada aplicación es necesario determinar el valor del COP medio estacional:

$$COP_{medioestacional} = \frac{Q_C}{W + W'}$$

Siendo:

- Q_C: Calor total cedido para la calefacción en el periodo considerado en valor absoluto (habitualmente un año).
- W: Trabajo realizado por el compresor sobre el fluido en el periodo considerado en valor absoluto.
- W': Resto de energías consumidas en el periodo considerado: pérdidas en el motor eléctrico, aportaciones externas de calor, etc.

Usando terminología anglosajona, al coeficiente de prestación estacional también se le denomina SPF (Seasonal Perfomance Factor). Es con este factor con el que se deben de comparar los gastos de funcionamiento de las diferentes alternativas de calefacción.

4. Tipos de Bombas de Calor y sus aplicaciones en edificios

Existen, ciertamente, muchas posibilidades de clasificar las bombas de calor, pero nos limitaremos a indicar las más interesantes en el campo de la edificación. La clasificación que hace referencia a la fuente energética de origen es la que nos permite obtener una tipología que obedece a su posible utilización constructiva propiamente dicha [2]. Principalmente podremos denominar a las bombas de calor como: aerotérmicas (aire- aire o aire- agua), hidrotérmicas (agua- aire o agua- agua) y geotérmicas (tierra- aire o tierra- agua).

4.1. Aire- Aire

Seguramente, es la tipología más utilizada, ya que la fuente fría de donde se toma el calor es inagotable y su instalación es muy sencilla. Como se muestra en la figura 6, en invierno se toma calor del aire exterior y es bombeado al interior del edificio a la temperatura deseada gracias al cambio de fase del refrigerante, según el funcionamiento ya descrito. En verano, toma calor del interior y lo transporta y expulsa al ambiente exterior.

Normalmente, se trata de aparatos partidos, los denominados "Split System". Presentan en ocasiones ventajas evidentes de espacio pero a un coste superior al compacto tipo ventana o consola (también habitual), siendo semejantes en cuanto a su aspecto exterior y tamaño a los equipos convencionales de aire acondicionado, obviamente su tamaño difiere según la potencia requerida.

Tradicionalmente, se ha empleado aire exterior como foco frío de la bomba de calor, porque su disponibilidad es universal, pero el funcionamiento de la instalación está supeditado a las condiciones climatológicas, disminuyendo el coeficiente de prestación COP que facilita la máquina a medida que lo hace la temperatura exterior. Cuando la superficie del evaporador tiene una temperatura inferior a 0ºC e inferior a la del rocío del aire, la formación de escarcha es inevitable. Este efecto reduce el COP como ya se mencionó.

Termodinámicamente, ya se ha expuesto que la capacidad de las bombas de calor funcionando en modo calefacción disminuye a medida que la temperatura exterior desciende. Para evitar esta dependencia siempre que el sistema lo permita, se aconseja el paso del aire de extracción de la instalación todo aire por el evaporador, aumentando la temperatura de operación del evaporador y reduciendo el problema de desescarche. Este sistema mejora el COP de la bomba de calor. El fenómeno del escarche se puede producir cuando la bomba de calor está funcionando en el ciclo de calefacción, la temperatura exterior es baja y hay humedad relativa alta. Este fenómeno consiste en la formación de escarcha, y posteriormente hielo, en la batería del evaporador impidiendo el paso del aire y dificultando, el hielo, la transmisión térmica entre el aire y el fluido refrigerante.

En edificios son habituales estas instalaciones. Constan de una unidad exterior y una unidad interior con conductos de distribución interiores, siendo muy favorables cuando se necesita refrigerar en verano y calentar en invierno. En ocasiones, el aire de determinados ciclos industriales, con un nivel térmico superior al ambiental, puede permitir utilizar estos sistemas como mecanismo de recuperación de energía residual a baja temperatura.

Este tipo de bomba de calor, aunque es la más extendida por su comodidad de funcionamiento en un país como el nuestro de clima templado en muchas zonas, y ser prácticamente inagotable la fuente originaria, presenta unas temperaturas críticas en las cuales, como ya hemos indicado, el rendimiento disminuye sensiblemente debido al fenómeno del escarche.

Tradicionalmente, se han considerado -5ºC como temperatura límite de funcionamiento con los sistemas convencionales de bomba de calor; además entre -4 ºC y 2 ºC su coeficiente de prestación desciende notoriamente, no presentando normalmente el uso de este tipo de sistemas ninguna ventaja energética. La investigación desarrollando tecnología electrónica para optimizar consumos, permite utilizar sistemas de bomba de calor en países de centroeuropa, donde las condiciones meteorológicas inicialmente no harían rentable su utilización.

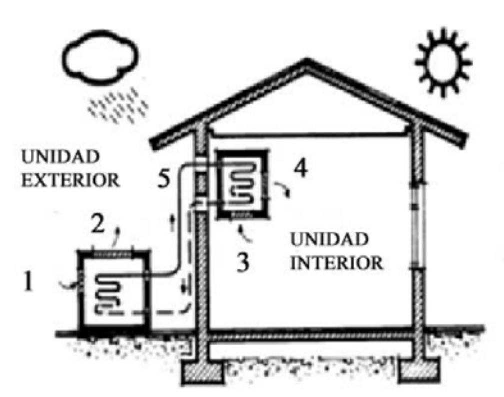


Fig. 6. Bomba de calor Aire- Aire.
Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005.

Además, hay que tener presente que la fuente de energía normalmente es la electricidad y que el precio de una unidad de energía es mucho mayor que la de un combustible de origen fósil para suministrar la misma carga térmica. Por otra parte, el comparativo del impacto medioambiental por los diferentes usos de energía debe realizarse teniendo en cuenta no sólo aspectos como el COP proporcionado por la bomba de calor, o la energía primaria consumida por unidad de energía eléctrica generada, sino el rendimiento de los sistemas convencionales de producción de energía, el origen de la energía eléctrica utilizada (no siempre de origen fósil y con diferente impacto ambiental), o los ya expuestos asociados al análisis del ciclo de vida de los diferentes sistemas de climatización que pueden ser planteados.

En localidades con inviernos muy fríos el dimensionamiento de una instalación con bomba de calor de aire exterior, se realiza para una temperatura de aire superior a la media anual, evitando sistemas excesivamente grandes, necesitando un sistema de apoyo adicional (caldera, resistencias eléctricas, etc.), que suministre la energía calorífica que la bomba de calor es incapaz de aportar.

Los edificios ya construidos con una instalación tradicional de generación térmica por combustión, son susceptibles de acoger una bomba de calor de aire exterior con relativa facilidad por la existencia de un sistema de calentamiento adicional permitiendo que, en condiciones climatológicas adversas, entre en funcionamiento la caldera o calderas que el edificio disponía antes de entrar en acción la bomba de calor.

Por este motivo resulta interesante integrar este tipo de bomba de calor "en modo recuperación" como se verá más adelante.

Una bomba de calor que utilice el aire de extracción como foco frío no sufrirá escarchado, salvo en funcionamientos anormales (por ejemplo el descenso inesperado de la temperatura del aire) y por estas causas los sistemas de desescarche previstos se incluyen como factor de seguridad y no como elemento de funcionamiento usual.

Actualmente en nuestro país la recuperación de energía térmica del aire de extracción mediante bomba de calor solamente es posible, por esa razón, en edificios singulares que incluyan ese sistema.

Por otra parte, el aislamiento de los edificios cuyas máximas ventajas son el ahorro de energía y el aumento del confort del mismo al reducir la diferencia de la temperatura del aire y de la pared, aporta la ventaja de que el calor no se vaya de forma incontrolada permitiendo usar este sistema como recuperador, y reducir el tamaño de la instalación al reducir la carga térmica para conseguir el mismo grado de confort.

Un edificio con muchas cargas interiores y con exigencias de confort ambiental en razón a su uso, ocupación, excelente aislamiento y ventilación, etc., presenta las condiciones de partida más idóneas para recuperar grandes cantidades de energía calorífica con este sistema.

Por el contrario, edificios de uso esporádico, escasa ocupación interior, o grandes pérdidas caloríficas, con especiales exigencias en confort, no resultan ciertamente adecuados para las bombas de calor aire-aire. Otro aspecto a tener en cuenta en diseño será el lugar para ubicar la unidad exterior, ya que a menudo no existe un lugar adecuado, o complica en exceso el sistema de distribución.

4.2. Aire- Agua

En lo que respecta al aire exterior, utilizado como fuente de energía, nos encontramos con los mismos problemas, en cuanto a temperaturas mínimas que en el apartado anterior. Por ello solamente en las zonas donde la temperatura exterior no sea excesivamente baja son recomendables las bombas aire-agua como sistema de calefacción cubriendo todas las necesidades caloríficas exigidas; por ello, su principal utilización es en sistemas bivalentes con un sistema de apoyo. Los sistemas de este tipo que mejores resultados ofrecen son los que utilizan como elementos terminales de la instalación fan-coils o suelo radiante, ya que estos sistemas trabajan con agua a temperaturas de 35-45º C, a diferencia de los sistemas de radiadores en los que el agua necesita mayor temperatura.

En estas instalaciones (Figura 7) la obtención del calor se realiza a partir del aire exterior, transfiriendo esta energía a un condensador de agua donde se suma, además, el equivalente calorífico del trabajo del compresor, calentándose el agua a una temperatura comprendida entre 30 y 60 ºC. Es decir, es una instalación de calefacción del tipo bivalente en el que la bomba de calor utiliza el aire como fuente hasta una determinada temperatura exterior variable según las zonas climáticas.

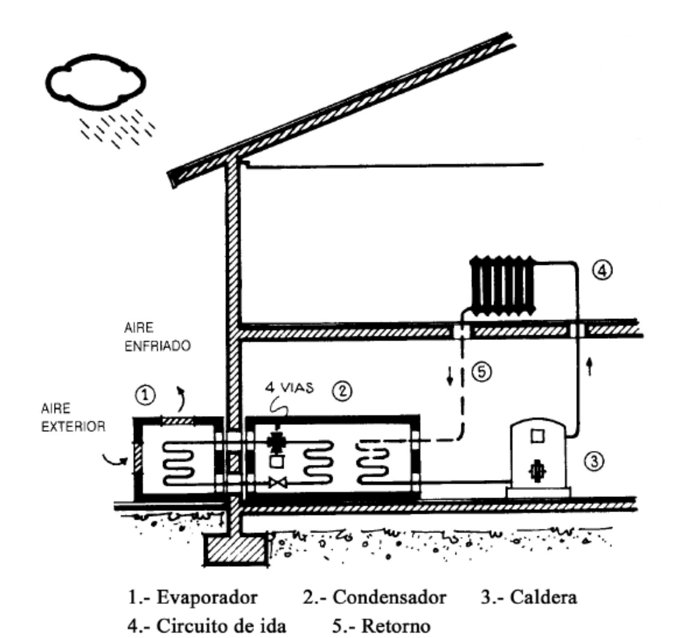
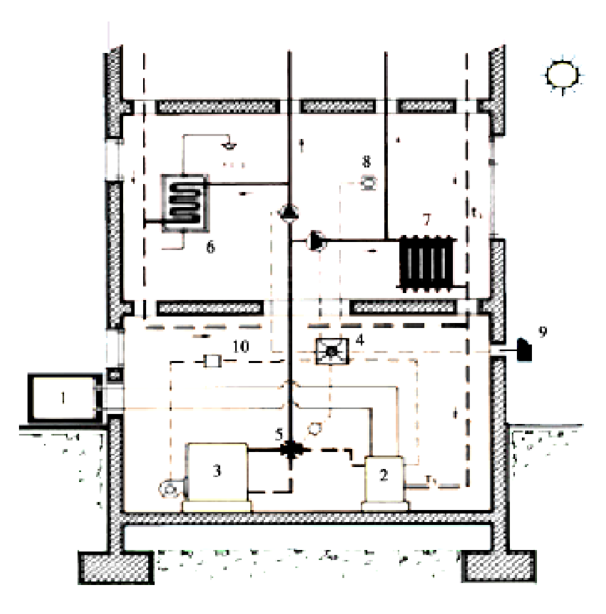


Fig. 7. Bomba de calor aire- agua apoyada por una caldera.
Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005

Este sistema combinado puede utilizarse también para producir calefacción y agua caliente sanitaria, según se muestra en el esquema funcional de la figura 8.



1.- Evaporador bomba de calor
2.- Condensador bomba de calor
3.- Caldera convencional
4.- Central reguladora de la instalación
5.- Válvula de cuatro vías
6.- Acumuladores de A.C.S.
7.- Radiadores
8.- Termostato de ambiente
9.- Sonda de temperatura ambiente
10.- Control de caldera

Fig. 8. Bomba de calor aire-agua con instalación de ACS y calefacción apoyada por caldera. Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005.

Estas instalaciones usan una conexión mediante válvulas de cuatro vías accionadas eléctricamente según las indicaciones de los correspondientes termostatos, de tal forma que se aprovecha por la bomba de calor la temperatura del fluido de retorno, mejorando su coeficiente de ampliación. El funcionamiento de este tipo de instalaciones es similar al de los sistemas tradicionales y pueden aumentar la vida útil de la caldera convencional.

La bomba de calor aire-agua organizada según estos sistemas consigue ahorros anuales de combustible fósil de hasta el 70%, aunque los gastos de inversión de la instalación resultan elevados. Son aparatos no reversibles en cuanto a sus ciclos de funcionamiento, y sin mecanismos de desescarche, con un formato de tipo compacto o partido (Split System), colocados en el retorno de la instalación de calefacción o de ACS. Quizá su mayor ventaja reside en ser una solución mecánica muy sencilla, de menor riesgo, conservación poco complicada y de una vida muy larga, factor éste de gran interés para un equipo cuya longevidad y seguridad de uso es función primordial.

Evidentemente, la rentabilidad es mayor en aquellos puntos de nuestra geografía donde no se presenten temperaturas mínimas extremas. Realmente, en este caso es importante introducir el concepto estacional verano-invierno ya que en el interior de la península existen numerosas zonas cuyas temperaturas mínimas y máximas oscilan entre los -5 ºC y +30 ºC, lo cual puede hacer indicado el uso de calefacción y refrigeración en las épocas invernal y estival respectivamente. Su uso a lo largo del año lo hace particularmente interesante, pues, el factor de funcionamiento continuo de la instalación, optimiza su rendimiento anual final [6].

Otra posibilidad de funcionamiento igualmente adecuado es el de las piscinas cubiertas con calentamiento del agua sanitaria y de la propia piscina. Esta exigencia, habitual en numerosos países europeos, se considera excelente para los resultados pretendidos. En efecto, resulta necesario, por un lado, una ventilación importante del local, y el volumen de agua a calentar (a una temperatura poco elevada) contribuyendo a la mejora del COP [7].

Los sistemas integrados bomba de calor – energía solar pueden proporcionar una alternativa viable energética, económica y medioambiental a las instalaciones de energía térmica convencionales.

Una instalación muy específica de esta clase se da en edificios de uso hotelero, particularmente en zonas turísticas del sur de España, está constituida por el acoplamiento de colectores solares con una bomba de calor aire-agua, que ya ha sido probada con mucho éxito para calefacción de piscinas y obtención de ACS. Estrictamente, no sería una bomba aire-agua, pero el uso del captador solar exterior lo hace admisible en cuanto a la fuente energética primaria.

Su ventaja complementaria más importante es el aumento del coeficiente de rendimiento de los captadores, de donde se obtiene una disminución de la superficie necesaria y, como consecuencia, de los costes iniciales.

4.3. Agua- Aire

Como hemos indicado repetidamente, en toda fuente energética en la cual la temperatura sea de 0ºC o inferior, se presenta el problema del desescarche, como consecuencia de la congelación del vapor de agua condensado al ser la temperatura de la pared del evaporador negativa e inferior a la del punto de rocío. El máximo peligro se plantea con temperaturas exteriores positivas cercanas a +0 ºC, pues por debajo de esta temperatura el contenido de agua del aire exterior es muy pequeño.

Frente al aire, el agua como fuente energética presenta indudables ventajas destacando las siguientes: temperatura más uniforme a lo largo del año, y posibilidad de obtener COPs más constantes. Debido al mayor calor específico del agua resultan equipos más pequeños a igualdad de potencia calorífica a suministrar que los que utilizan el aire como foco frío, obteniéndose unos coeficientes de prestación superiores. El nivel de ruido es menor porque las bombas necesarias para la impulsión de agua son más silenciosas que los ventiladores necesarios para los equipos de aire; incluso en épocas frías la temperatura del agua permite que la máquina suministre todas las necesidades caloríficas, manteniendo coeficientes de prestación altos y no siendo preciso en la mayor parte de las ocasiones un apoyo energético auxiliar sean calderas o resistencias eléctricas.

Por todo ello, otra posible solución a aplicar es la de la bomba de calor agua-aire, la cual extrae el calor de un circuito de agua y lo transfiere a un circuito de aire. Sumándosele además el equivalente calorífico del trabajo del compresor.

Tradicionalmente se ha recurrido a las aguas superficiales, ríos y lagos, o aguas subterráneas poco profundas que mantienen una temperatura a lo largo del año entre 10 y 15 ºC aproximadamente.

La mayor dificultad reside en encontrar cerca un pozo, río o capa freática, los cuales se hallen a una temperatura media de +13 ºC, para que no se produzcan costes de bombeo importantes. Otra ventaja reside en que las aguas subterráneas tienen poca variabilidad en su temperatura lo que permite a la máquina un funcionamiento regular, con rendimientos elevados. Además, es posible el uso del procedimiento de calefacción y refrigeración dentro del mismo edificio (en oficinas, por ejemplo), si se dan necesidades simultáneas de calor y de frío durante muchos periodos del año.

En todo caso la previsión de una bomba de calor de agua-aire queda restringida a edificaciones con ubicación próxima a masas de agua que deberán existir en cantidades suficientes para que se garantice el funcionamiento de la instalación a lo largo del año.

Resulta por tanto evidente la mayor complicación técnica de la instalación y la necesidad de contar con grandes cantidades de agua, así como las medidas de control de ésta, que debe cumplir determinados requisitos. Es por ello que su proyección futura parece orientarse hacia su conjunción con la energía solar, lo que simplificaría su instalación y proporcionaría ahorro energético.

4.4. Agua- Agua

Su funcionamiento es similar al anterior, pues obtienen la energía de un circuito de agua transfiriendo ésta junto con la consumida por el compresor a otro circuito también de agua a mayor temperatura. Los requisitos en cuanto a calidad del líquido y eventual ubicación junto a un lago, capa freática, pozo, etc., son los mismos del caso anterior, junto con el bombeo de agua normalmente entre dos pozos, uno de alimentación y otro de retorno, según se muestra en la figura 9. El agua debe devolverse al lugar de origen tras su enfriamiento, lo cual puede crear problemas por baja inercia térmica. La utilización correcta del agua subterránea exige la construcción de dos pozos separados, uno para la alimentación y otro para el retorno del agua enfriada por el evaporador.

Reduciendo el valor de la temperatura de generación se puede aumentar el rendimiento de la bomba de calor. Una solución consiste en aumentar la superficie de la instalación para aumentar la radiación y, por tanto, rebajar su temperatura unitaria. El sistema de suelo radiante puede funcionar con una temperatura de 35 ºC e inferiores en lugar de los 70 ºC de una instalación clásica, es un sistema favorable para la bomba de calor agua-agua. La calefacción por suelo radiante permite obtener coeficientes de rendimientos del orden de 5.

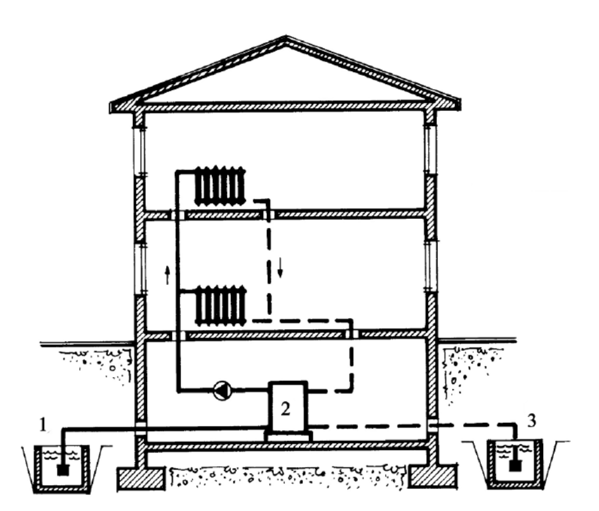


Fig. 9. Bomba de calor agua- agua apoyada para calefacción. Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson ,2005

El empleo de los colectores solares resulta muy adecuado, aunque la instalación sea ciertamente compleja, como se aprecia en la figura 10. En este caso el evaporador de la máquina se encuentra conectado a una instalación de colectores solares con agua glicolada para evitar problemas de congelación. El calor captado por los colectores solares cuando su temperatura es superior a la del depósito del almacenamiento de la calefacción o ACS, se envía directamente a éstos, mientras que si la temperatura de los colectores es inferior a la de los depósitos, la bomba de calor se pone en funcionamiento para aportar la energía calorífica que falta, actuando en este caso la bomba de calor como sistema de apoyo. Es fácil apreciar que la inversión requerida será muy alta ya que al costo de la bomba de calor se le suma el de la instalación solar.

Este tipo de instalación es similar a la indicada en último lugar en el apartado anterior pues en ambos casos la bomba de calor exigida es del tipo agua-agua, siendo por ello en la práctica dificultoso establecer una separación clara entre la fuente energética original y el propio funcionamiento de la bomba. Por ello es más definitorio quizá indicar como bombas de calor agua-agua, aquellas que utilizan el agua de río o de pozos como foco frío.

Así, tendremos que en edificios con superficies a climatizar considerables y con exigencias severas de confort, incluyendo la refrigeración en verano, la previsión de esta doble función mediante instalaciones modulares proporciona rendimientos netamente favorables.

Mediante un sistema de canalizaciones exclusivamente de agua por todo el edificio, se pueden organizar los terminales en cada local con las bombas de calor ajustadas estrictamente a sus distintas necesidades termo-frigoríficas, resolviéndose así con sencillos elementos de tipo fan-coil, exigencias de calor y frío simultáneamente utilizando una regulación que hace que el funcionamiento puede independizarse totalmente.

1.- Acumulador agua caliente sanitaria
2.- Fan coil
3.- Colectores solares
4.- Depósito de capacidad variable
5.- Precalentador
6.- Bomba de calor

Fig. 10. Instalación de bomba de calor agua-agua con colectores solares en edificio público. Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005.

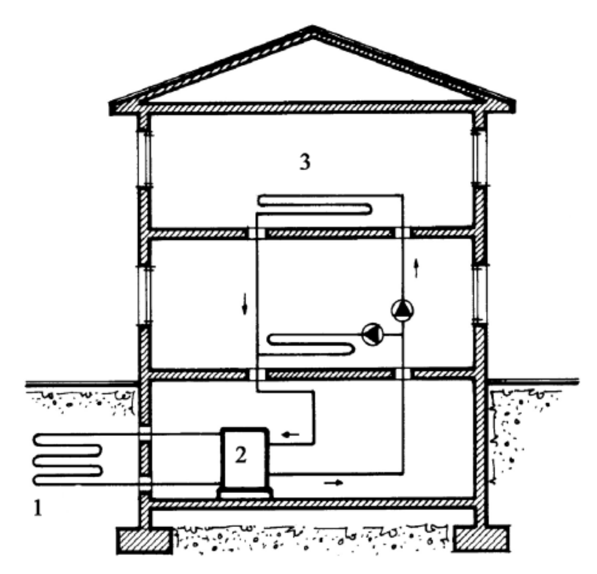
4.5. Tierra- Agua

Este tipo es muy similar al anterior, pero es el suelo la fuente fría en base a su temperatura muy constante y uniforme derivada de su gran inercia térmica. Se han hecho estudios sobre esta solución, debido a los diferentes tipos de suelo, humedades o inercia de los mismos, etc., con vistas a su posible utilización, pero la realidad es que, actualmente, se encuentran prácticamente limitadas a la calefacción de las viviendas unifamiliares aisladas. Es necesaria una considerable cantidad de terreno para enterrar el serpentín, recorrido por un caudal de agua o de agua glicolada si existe riesgo de congelación, que sirve de captador de energía térmica acumulada en el subsuelo.

El suelo actúa como un fluido térmico en un intercambiador enterrado (Figura 11) que está constituido por tubos de plástico de polipropileno enterrados a 1,50 m de profundidad, con agua glicolada en forma de serpentines que se calientan a una temperatura entre 6 y 10 ºC.

La bomba de calor que utiliza en el evaporador el agua procedente de la instalación enterrada se encuentra en el interior del edificio, donde se produce agua caliente para ser utilizada en el circuito de calefacción por suelo radiante o con convectores para generar aire caliente, donde no se requieren niveles térmicos excesivamente elevados.

Las necesidades de espacio (3 a 4 veces la superficie total construida del edificio), así como los problemas del movimiento de tierras e incluso enfriamiento del propio terreno por la acción de la bomba de calor (especialmente en suelos húmedos), pueden producir formación de hielo y posibles movimientos de los terrenos durante el posterior deshielo.



1.- Cables enterrados 2.- Bomba de calor
3.- Calefacción por cables radiantes empotrados en el suelo

Fig. 11. Calefacción por bomba de calor tierra-agua con suelo radiante. Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005

En todo caso, disponiendo de espacio exterior suficiente, se pueden satisfacer de una forma segura las necesidades caloríficas y frigoríficas de la vivienda, si bien con la contrapartida de ocupar prácticamente toda la superficie próxima al edificio con los serpentines instalados en el suelo, lo que hace en la práctica imposible su uso en los núcleos urbanos, excepto en zonas de ciudad-jardín.

Se han hecho estudios y actualmente hay líneas de investigación oficiales con el fin de determinar la tipología y diámetro de los tubos, pero en todos se concluye que cada caso es en sí mismo particular porque las propiedades del terreno, su configuración, existencia o no de árboles y tipo de especies de los mismos, etc., pueden hacer variar el problema de forma sustancial.

Una disposición media puede ser la de la figura 12 colocando dos tubos en la parte superior de la zanja recubiertos con 30 o 40 cm de tierra, colocando posteriormente otros dos tubos de la misma forma y recubriendo con tierra totalmente la zanja. A este nivel de profundidad mínimo de 1,20 m. no existen perturbaciones por la vegetación superficial, y el efecto de la inercia térmica del terreno resulta suficiente.

En la época de invierno el evaporador toma calor de la tierra mediante la red de tuberías enterradas en zanjas cediendo el condensador su calor a la masa de agua que se acumula en un depósito. En el ciclo de verano, el calor del condensador se disipa a tierra mediante esta tubería.

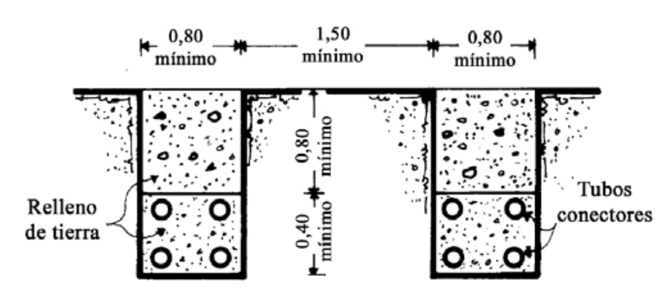


Fig. 12. Zanjas tipo para la disposición de los tubos colectores del sistema tierra-agua. Fuente: "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005

A pesar del funcionamiento bastante uniforme de esta bomba de calor y el aprovechamiento al máximo de sus capacidades la mayor parte del año, un importante inconveniente es el terreno que se necesita disponer para el serpentín enterrado.

Como el problema de disponibilidad de espacio exterior para la disposición horizontal de los serpentines es algo común en la mayoría de las aplicaciones que se encuentran hoy en día, una disposición alternativa que ofrece unos mejores rendimientos es la utilización de sondas verticales, denominadas sondas geotérmicas, que se aprovechan de una temperatura mucho más constante e indiferente al periodo estacional a medida que aumentamos la profundidad de la perforación. En la figura 13 se puede ver la distribución de temperaturas en función de la profundidad del sondeo en diferentes periodos estacionales.

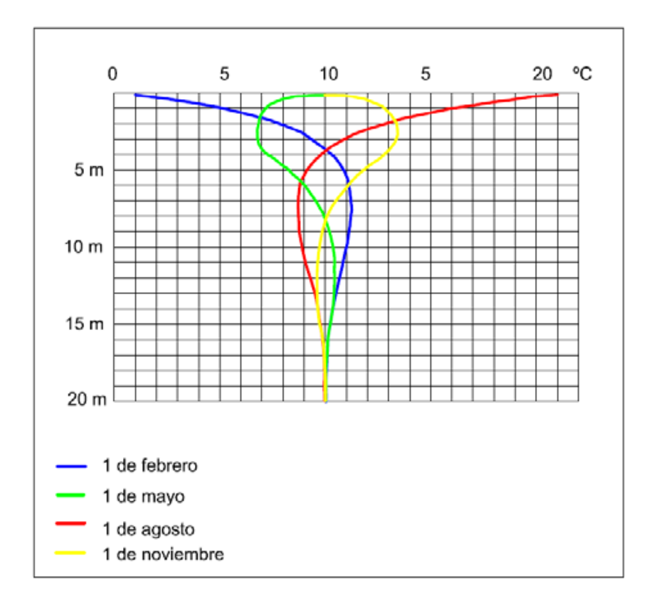


Fig. 13. Distribución de temperaturas bajo la superficie terrestre.

Los sistemas con intercambiador vertical suponen la perforación de sondeos de profundidad variable (normalmente, entre 60 y 200 metros) y pequeño diámetro (de 10 a 15 cm), en los que se introducen colectores de calor, un doble tubo en el caso más sencillo por los que circula el fluido.

Los tubos captadores se introducen en los sondeos tras finalizar la perforación. Habitualmente, se instalan tuberías de polietileno o polipropileno, cuyo diámetro varía entre 3/4” (19,05 mm) y 2” (50,8 mm), en función del caudal circulante y la longitud del circuito.

La transmisión de calor entre los tubos captadores situados en el interior del sondeo y su alrededor es importante, por lo que además del conocimiento previo de la conductividad térmica del terreno para el diseño de la sonda, se deben emplear materiales con una adecuada conductividad térmica para el relleno del sondeo y que a su vez permitan la circulación del agua que pueda existir, ya que el agua aumenta la capacidad de transmisión de calor del terreno.

Los colectores de las sondas pueden disponerse junto a las edificaciones o debajo de ellas, o bien, las tuberías pueden conectarse en el exterior del edificio en zanjas en el terreno. Las instalaciones que disponen de bomba de calor acoplada a circuitos cerrados con intercambiadores verticales son de dimensiones muy variadas: desde viviendas unifamiliares con un solo intercambiador hasta grandes edificios que requieren campos con un importante número de sondas geotérmicas.

También es posible colocar los tubos captadores que alimenten bombas de calor geotérmicas en el interior de elementos estructurales de edificios, túneles, puentes u otras estructuras en contacto con el terreno de diferentes infraestructuras que circulan bajo grandes ciudades, con el objetivo de climatizar las propias infraestructuras o edificios situados en zonas próximas.

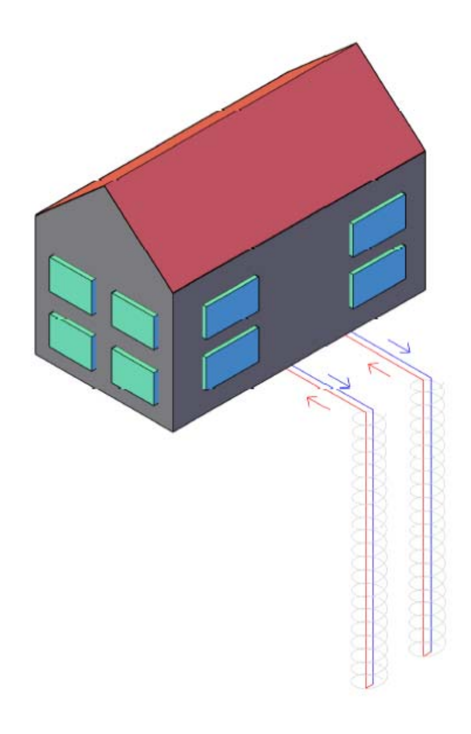


Fig. 14. Sondas geotérmicas junto a edificio.

5. Proyecto de una Bomba de Calor Geotérmica

Se ha seleccionado el proyecto de una instalación de calefacción y ACS mediante bomba de calor geotérmica en una vivienda unifamiliar aislada situada en León. El motivo de haber seleccionado este proyecto es integrar un sistema de energía renovable en viviendas tipo que componen el parque inmobiliario de nuestro territorio nacional. Los resultados y la configuración de la instalación pueden hacerse extrapolables a otras instalaciones de este tipo de viviendas.

Esta instalación es adecuada en viviendas, que en muchas ocasiones se encuentran alejadas de núcleos urbanos, y donde no suelen llegar los abastecimientos de gas natural.

El sistema de calefacción mediante suelo radiante es idóneo para emplearlo con este tipo de producción ya que utiliza el agua caliente a una temperatura inferior a los sistemas convencionales de calefacción, como puede ser un sistema mediante emisores radiantes (radiadores), por lo que el consumo de energía es menor, también el coste económico de operación y además tiene un menor impacto medioambiental en emisiones de CO_2.

El suelo radiante, mediante un buen control, consigue un mayor nivel de confort térmico que un sistema convencional

La vivienda consta de cocina-salón-comedor, 4 dormitorios, 2 salas, 3 baños y un garaje repartido en dos alturas. La superficie total de la vivienda es de 350 m^2. Aunque el garaje no está calefactado, la superficie total a calefactar supera los 250 m^2 [8].

La zona climática presenta temperaturas exteriores mínimas en torno a los -4,8 ºC. Las temperaturas exteriores máximas en periodo de verano se aproximan a los 34 ºC.

Se estima para esta vivienda una demanda de energía para calefacción de 13.126 kWh, obteniéndose con la bomba de calor geotérmica instalada un rendimiento estacional (COP) de 4,85. Para ACS la demanda es de 1.098 kWh. El regulador de balance de energía integrado en la bomba de calor adapta de manera óptima e individualizada los tiempos de servicio y de parada del compresor al comportamiento de la vivienda. De este modo se consigue optimizar el funcionamiento. Para abastecer las necesidades de la vivienda se utilizan 37.025 kWh de energía primaria.

La demanda de ACS se ha calculado siguiendo las prescripciones del CTE, teniendo en cuenta la existencia de 4 dormitorios, suponiendo una ocupación de 6 personas, asignando un caudal de 30 litros por persona y día, lo que supone un consumo de 223 litros a 55 ºC por día.

Para la aportación de la energía necesaria, tanto para calefacción como para ACS, se emplea una bomba de calor geotérmica Vaillant, concretamente el modelo VWS 220/2.

El sistema empleado para calefacción es un suelo radiante. El esquema de la instalación lo podemos ver en la figura 16.

Se trata de un generador de alta eficiencia energética que transforma la energía renovable, almacenada en el subsuelo, en confort para el edificio, de tal forma que más del 75% de la energía necesaria para ello se obtiene de forma gratuita.

El sistema de captación es de tipo horizontal y consta de tubería plástica para transporte de agua glicolada, los captadores se encuentran enterrados a una profundidad de 1 metro. Este sistema horizontal es el idóneo cuando se dispone de terreno suficiente en los aledaños del edificio puesto que la excavación siempre resulta menos costosa que las perforaciones.

Ubicado en un cuarto en el garaje, el sistema se compone de una bomba de calor geotérmica tierra-agua de 10,4 kW de potencia modelo geoTHERM VWS 220/2 de Vaillant en conexión con dos interacumuladores modelo VIH 200/5 también de la casa Vaillant, equipados con un serpentín y con capacidad de 200 litros.

• *Características de la bomba de calor geotérmica:*

- Potencia térmica (B5W35 ΔT5K según EN-14511): 24,8 kW
- Consumo eléctrico: 5,2 kWh
- Coeficiente de rendimiento (COP): 4,8
- Tensión nominal: 420V/50 Hz 3/N/PE
- Nivel de potencia sonora: 63 dB (A)
- Dimensiones: 1.200 x 760 x 1100 mm
- Peso: 326 kg

Este modelo cuenta además con una serie de características especiales que aportan interesantes ventajas tanto al profesional como al usuario:

- Temperaturas de salida de hasta 62 °C.
- Tiempos de montaje muy reducidos gracias al modo de construcción compacto.
- Conexiones desde atrás o desde arriba.
- Combinable con diferentes depósitos de agua caliente.
- Funcionamiento silencioso, gracias al aislamiento sonoro en varios niveles (MSI).
- Alto grado de efectividad gracias al moderno compresor scroll de larga vida útil.
- Ergonomía de manejo Vaillant "girar y hacer clic".
- Circuito frigorífico controlado por sensores.

•.*Características del acumulador:*

- Nº de serpentines: 1
- Capacidad: 285 l
- Superficie de transmisión de calor: 2,9 m2
- Contenido de agua del intercambiador: 17,5 l
- Caudal máximo de ACS 45/10ºC: 345 l/h

•. *Aplicaciones y ventajas de la instalación con bomba de calor geotérmica.*

Se trata de un tipo de instalación de aplicación idónea entre otras en vivienda individual y colectiva, centros de enseñanza y guarderías, etc.

Las ventajas principales que presenta este sistema son las propias de las soluciones con suelo radiante como son el ahorro que se consigue gracias a emplear temperaturas de calefacción bajas, el alto grado de confort, el ambiente saludable con temperatura estable, bien distribuida y sin corrientes, la libertad total para la decoración y distribución del mobiliario, etc. unidas a las de reducción del coste energético y respeto al medio ambiente que aporta la geotermia.



Fig. 15. Cuarto de instalaciones.

A continuación se exponen de forma abreviada algunas de las características de la instalación.

Tabla 1
Cumplimiento de las exigencias mínimas del CTE

Localidad	León
Tipo de vivienda	Vivienda Unifamiliar aislada
Tipo de aislamiento	CTE
Superficie	350 m2
Temp. límite func. en calefacción	27,0 ºC
Temp. límite func. en refrigeración	19,0 ºC

Tabla 2
Datos particulares

Temperatura Máxima	33,6 ºC
Temperatura Mínima	-4,8 ºC
Zona Climática Calefacción	E1
Demanda W/m^2.K	2,94
Cobertura solar según CTE	SI
Zona Climática ACS	3
Precio electricidad	0,1601 €/kW
Pelets (DINplus)	0,0423 €/kW
Precio gas natural	0,0470 €/kW
Precio gas propano	0,0650 €/kW
Precio gasóleo	0,1030 €/kW

Tabla 3
Funcionamiento del sistema

	Funcionamiento											
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Invierno	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
Verano	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0

Tabla 4
Horarios y potencias

Horarios y temperaturas de funcionamiento				
	Inicio	Fin	Invierno	Verano
Horario de	8 h.	20 h.	20 h.	24 h.
Resto del horario			17 ºC	26 ºC

Rendimientos		
Caldera Gas Natural	CONDENSACIÓN	0,95
Caldera Gas Propano	0	0,92
Caldera Gasóleo	0	0,9
Temperatura primario en invierno		5 ºC
Temperatura primario en verano		25 ºC

Curva de calefacción		
A máxima demanda	-4,8 ºC	40,0 ºC
A mínima demanda	17,0 ºC	25,0 ºC
Curva de Refrigeración		
A máxima demanda	33,6 ºC	7,0 ºC
A mínima demanda	19,0 ºC	7,0 ºC
Apoyo máximo Bomba Calor		NO
(1) VWS 220/2	Temp.	Capac.
Calefacción	B5/W40	24,6 kW.
ACS	B5/W50	23,4 kW.
Refrigeración	B7/W25	0,0 kW.

Calcular ACS			SI
Núm. habitaciones		4	6 Pers.
Caudal por persona y día			30 l.
Tolal día			223 l.
Temperatura ACS			55 ºC
Horario calentamiento ACS			
de	22 h.	a	8 h.
Consumo	COP	Cobertura solar ACS	
		Joule	Resto
5,6 kW.	4,39		
6,5 kW.	3,6	70%	50%
0,0 kW.	0		

Tabla 5
Cálculo de demandas y comparativa entre sistemas

Demandas anuales	Calefacción 3.952 kWh.	ACS	Aportación Solar ACS	Refrigeración	Costo Anual	Emisión CO2	Energía Primaria
Eléctrico	10.182 €	190 €	70%		10.372 €	42.054 kg	168.671 kWh.
Gas Natural	3.148 €	109 €	50%		3.257 €	14.134 kg	70.048 kWh.
Gas Propano	4.494 €	151 €	50%	Aire-Aire Standard 0 €	4.646 €	17.439 kg	77.258 kWh.
Gasóleo	7.280 €	239 €	50%		7.520 €	20.953 kg	77.258 kWh.
Pelets	3.166 €	197 €	0%		3.363 €	0 kg	0 kWh.
BOMBAS DE CALOR	Calefacción	ACS	Apoyo	Refrigeración	Total	CO2	E. Primaria
1 Uds. B.C. Geotérmica modelo VWS 220/2 (SPF ANUAL: 4,75)	2.101 €	176 €	Eléctrico	0 €	2.277 €	9.231 kg	37.025 kW.
	13.126 kWh.	1.098 kWh.	0 kWh.	0 kWh.	Apoyo Máx.		0 h.
	4,85 (COP)	3,60 (COP)	4,75 (SPF)		Temp. Balance		0 €
2 Uds. B.C. Aerotérmica modelo Genia Air 15 (SPF ANUAL: 3,67)	2.712 €	221 €	Gas Natural	0 €	2.938 €	11.913 kg	47.804 kW.
	16.944 kWh.	1.383 kWh.	97 kWh.	0 kWh.	Apoyo Máx.	5,0 kW.	28 h.
	3,75 (COP)	2,86 (COP)	3,67 (SPF)		Temp. Balance	-1,4 ºC	5 €

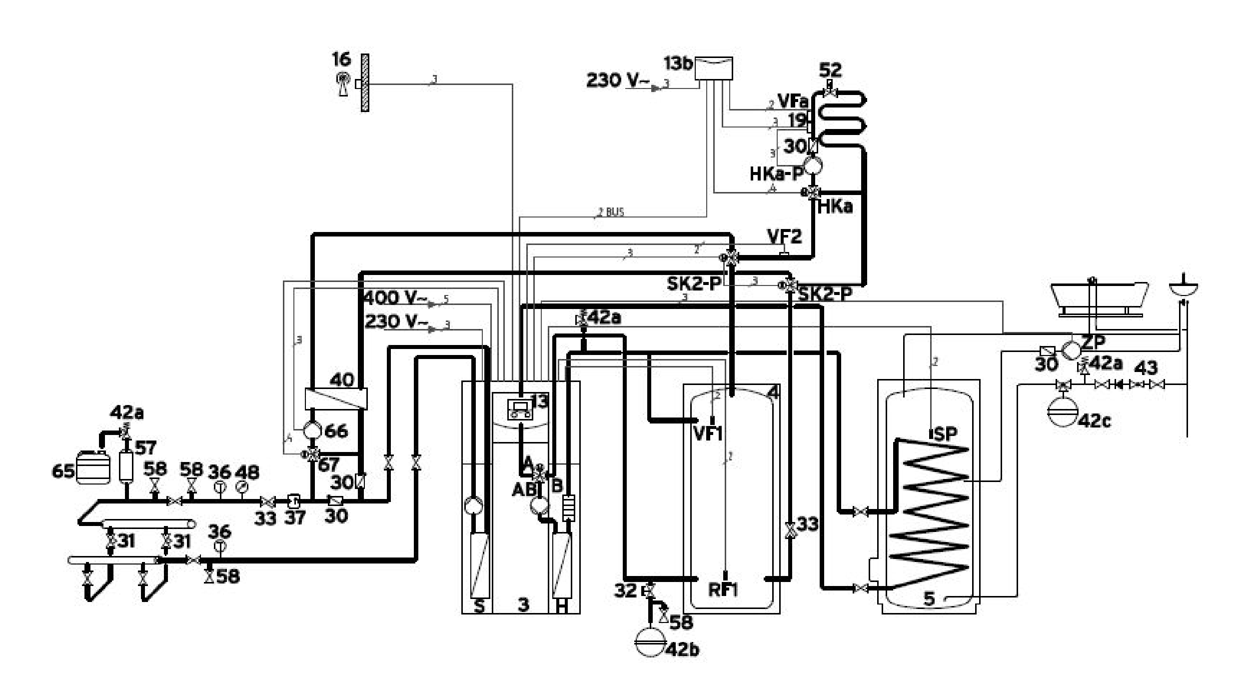


Fig. 16. Esquema de la instalación.

6. Conclusiones

Una de las tecnologías que consigue una elevada eficiencia y ahorro energético en la climatización de edificios son las denominadas Bombas de Calor. Se trata de una tecnología amigable con el medio ambiente por utilizar energías renovables para su funcionamiento.

Por su naturaleza, el calor fluye de forma espontánea desde condiciones de mayor a menor temperatura. Sin embargo, una Bomba de Calor es capaz de forzar el flujo de calor en la dirección opuesta, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña.

Las Bombas de Calor pueden transferir energía desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura (foco frío), tales como aire, agua o la propia tierra, hacia el interior del espacio a acondicionar o bien para emplearlo en procesos que precisan calor en la edificación o la industria.

Por otra parte, este tipo de sistemas también pueden ser utilizados para refrigerar. En este caso la transferencia de calor se realiza en el sentido contrario, desde el lugar que requiere frío, al entorno que se encuentra a una temperatura superior.

El 40% del consumo de energía en Europa corresponde a los edificios existentes. Un 85% de este consumo sirve para cubrir la necesidad de calor de calefacción y ACS de los edificios. Esto corresponde aproximadamente a un tercio del consumo total de energía en Europa. El aumento de la eficiencia de las instalaciones existentes en los edificios puede lograr un ahorro de energía del 30% e incluso más. Para lograr este objetivo, se deberán incrementar la eficiencia energética de los equipos, un papel muy importante lo juegan las nuevas tecnologías más eficientes empleadas en la climatización de los edificios, como es el caso de las Bombas de Calor. Paralelamente, se deberá disminuir el consumo de los recursos de energía fósiles, mediante la intensificación del empleo de las energías renovables.

La Unión Europea mediante una serie de Directivas determinadas por el Consejo Europeo estableció los objetivos "20:20:20", que consiste básicamente en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono en un 20% en relación a 1990, en un aumento del porcentaje de energía renovable sobre el consumo total de energía en un 20%, y el aumento de la eficiencia energética en un 20%. Estas Directivas son principalmente: la Directiva de eficiencia energética en los edificios, EPDB, la Directiva de requisitos de diseño ecológico de productos que utilizan energía, ErP, y Directiva de la promoción de la utilización de energía de fuentes renovables, RES. Es en ésta última donde se establece que la energía aerotérmica, geotérmica e hidrotérmica capturada por las Bombas de calor se tendrá en cuenta a efectos del cálculo de la cuota de energía procedente de fuentes renovables, siempre que la producción final de energía supere de forma significativa el consumo de energía primaria necesaria para impulsar la Bomba de Calor. Esto supone un importante impulso a la tecnología de las Bombas de Calor, ya que la hace comparable (con restricciones) a otras más comúnmente aceptadas o conocidas como tales como la eólica, solar, hidráulica, etc. Esto permite integrar las Bombas de Calor en edificios con dos objetivos: uno, el emplearla como tecnología muy eficiente en sistemas de climatización y el otro, como una tecnología que es renovable pudiendo competir con la solar y la biomasa.

El potencial de las Bombas de Calor para reducir las emisiones de CO_2 en nuestro país, es del 14% sólo considerando la climatización y el consumo para A.C.S. en los sectores residencial y de servicios.

Uno de los aspectos importantes a la hora de tener en cuenta las Bombas de Calor como una tecnología adecuada a la aplicación que interese será las condiciones climatológicas del lugar, ya que en climas extremos, como el caso de temperaturas por debajo de 5ºC, los COP de las Bombas de Calor aire-aire o aire-agua se ven reducidos de forma considerable. En cambio, una de las ventajas más importantes es la posible utilización como fuente fría del terreno, ya que las condiciones del suelo son muy estables a partir de cierta profundidad, puesto que no varían con las condiciones climáticas y los COP de estos equipos se encuentran claramente por encima de 4.

La tecnología de las Bombas de Calor nos permite alcanzar ahorros considerables, tanto económicos como de emisiones de CO_2, por lo que hace de estos equipos una tecnología más que adecuada para conseguir un desarrollo sostenible, siendo una de las tecnologías con mejores perspectivas de implantación para la climatización de edificios, sobre todo en España, en zonas climáticas suaves.

Glosario

Bomba de calor: máquina térmica capaz de transportar energía en forma de calor desde un ambiente a otro, desde una fuente fría a otra más caliente.

Desarrollo Sostenible: conjunto de estrategias que garantizan la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas.

Eficiencia energética: capacidad de reducir el consumo energético con el menor impacto sobre el medio ambiente.

Ciclo termodinámico: secuencia de procesos termodinámicos que empieza y termina en el mismo estado. Al final de un ciclo existe una transferencia de calor entre fuentes y una producción o consumo de trabajo.

COP: eficiencia de las bombas de calor, coeficiente de prestaciones (*coefficient of performance*) del ciclo de una máquina. Relación entre la potencia de frío o calor desarrollada por la máquina y la potencia consumida

Intercambiador de calor: equipo en el que dos corrientes de fluidos a distinta temperatura fluyen sin mezclarse con el objeto de intercambiar energía térmica.

Energía renovable: se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Refrigerante: un refrigerante es un producto químico líquido o gaseoso, fácilmente licuable, que se utiliza como de medio transmisor de calor entre otros dos en una máquina térmica. Los principales usos son los refrigeradores y los acondicionadores de aire. El principio de funcionamiento de algunos sistemas de refrigeración se basa en un ciclo de refrigeración por compresión, que tiene algunas similitudes con el ciclo de Carnot y utiliza refrigerantes como fluido de trabajo.

Conductividad térmica del terreno: es una característica propia de cada tipo de terreno e indica su capacidad para conducir el calor, se expresa en W/m°C o W/mK. El cálculo de la conductividad térmica para el diseño de un sistema de bomba de calor geotérmica se puede estimar a partir de tablas, medir en laboratorio mediante pruebas de conductividad sobre parte de terreno recogido o determinar realizando un test de respuesta térmica del suelo (Thermal Response Test, TRT); este último método es el más fiable.

Bibliografía

[1] Rey Martínez, F. J.; San José, J. F.; Velasco Gómez E. Y Alvarez-Guerra Plasencia, M. "Recuperación de Energía en Sistemas de Climatización. DTIE 8.01. Editorial ATECYR. 1996 (Madrid).

[2] Rey Martínez, F. J.; Velasco Gómez, E.; "Bombas de Calor y energías renovables en edificios". Ed. Thomson, 2005.

[3] D. A. Reay, D. B. A. Macmichael. "Heat Pumps Design and Appications". Pergamon Press.1979.

[4] Monasterio Larrinaga, R.; Hernández Martín, P.; Saiz Hernández, J.; "La Bomba de Calor. Fundamentos, técnicas y aplicaciones". Editorial McGraw-Hill/ Iberdrola/ EVE, 1993.

[5] Pizzetti, C. "Acondicionamiento del aire y refrigeración. Teoría y cálculo de las instalaciones". 2ª Edición, Editorial Bellisco, 1991.

[6] Arizmendi Barnes, L.J. "Cálculo y Normativa básica de las instalaciones en los edificios. Tomo II-Instalaciones energéticas y electrotécnicas". Ediciones EUNSA.

[7] Rey Martínez, F. J.; Velasco Gómez, E.; "Experimental study of indoor air quality, energy saving and analysis of ventilation norms in climatised areas." Revista Energy and Building. Editorial: Elsevier Science. Volumen: 33, 2000 (Ámsterdam).

[8] Vaillant.

Materiales edificatorios en una construcción industrializada ecológica

Building Materials in an Ecological Industrialized Construction

Joan-Lluís Zamora i Mestre [a] *

[a] *Dr. Arquitecto. Departament de Construccions Arquitectòniques I. E.T.S. de Arquitectura del Vallès. Universitat Politécnica de Catalunya*

Resumen

La construcción industrializada no es aún una realidad plena en el Estado Español, aunque existen ejemplos concretos y puntuales de algunos logros. La mayoría de la realizaciones en edificación que se califican de industrializadas son logros realizados con tecnologías avanzadas desarrolladas en el sector de los bienes de consumo. En medio de esta situación, las nuevas exigencias que plantea la sostenibilidad han irrumpido con mucha fuerza y urgencia. Sin embargo, dado su carácter transversal y universal, afectarán a todos los procesos y constituyen un reto para todo el sistema. Esta irrupción en medio de un sector actualmente en crisis financiera y en lenta transición hacia la industrialización plantea tres grandes retos: (i) desarrollar unas tecnologías nuevas y específicas para hacer frente a los retos de la sostenibilidad dado que las actuales deben ser remodeladas o abandonadas progresivamente, (ii) dotar a estas tecnologías de un soporte industrializado que las haga eficientes y asequibles, (iii) y generar un sector económico capaz de proporcionar habitabilidad.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Materiales Renovables, Reducción de los Residuos Materiales, Materiales Reciclados, Productos de Construcción, Sistemas Constructivos

Abstract

Even though there are specific and occasional examples of certain achievements, industrialized construction is not yet a full reality in the Spanish State. Most of these achievements in building construction classified as industrialized works are made with advanced technologies developed in the consumer goods sector. In this situation, the new requirements established by sustainability have erupted strongly and urgently. However, considering its transversal and universal character, they will affect all the processes and constitute themselves an objective for the whole system. This burst into a sector with a current financial crisis and a slow transition towards the industrialization sets out three main challenges: (i) the development of new and specific technologies to meet the challenges of sustainability since the current technologies should be remodelled or abandoned progressively, (ii) providing these industrial technologies with support that makes them more efficient and affordable, and (iii) generating an industry capable of providing habitability.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Renewable Materials, Waste Materials Reduction, Recycled Materials, Building Products and Systems

1. Introducción

Abordar una disertación actual sobre los materiales propios de la edificación, ante la perspectiva de una construcción industrializada y ecológica, requiere de un protocolo de aproximación a la cuestión.

En primer lugar, contextualizar la relación entre materia y arquitectura, que viene desde muy antiguo pero que nunca antes había estado tan marcada por las actuales circunstancias económicas y ambientales.

En segundo lugar, establecer las bases comunes que permiten atribuir a cada uno de los conceptos: habitabilidad, industria y sostenibilidad, ser en cada caso FIN, MEDIO y REQUISITO.

En tercer lugar, actualizar la disciplina de la habitabilidad. En su concepción más decimonónica ha constituido un sólido freno disciplinar al deterioro imparable del hábitat privado humano tal como aún se aprecia en amplias zonas urbanas del planeta. En su actual concepción pretende abarcar también los aspectos sociales y productivos relacionados con las personas a los que la arquitectura y la ciudad prestan soporte físico.

En cuarto lugar, intentar delimitar el concepto actual de industrialización. Muy a menudo los arquitectos utilizamos

* joan.lluis.zamora@upc.edu

Citar como: Zamora i Mestre, J.L. (2012). Materiales edificatorios en una construcción industrializada ecológica. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 224 - 249). San Sebastián, España. Editorial de la UPV/ EHU

este concepto de forma reductiva como sinónimo de mecanización. Pero industrializar no es en sí un medio sino un método para proporcionar los bienes materiales que precisamos, pero que trasciende por mucho los medios tecnológicos que en cada momento lo han hecho posible. Inicialmente fue la mecánica, ahora tal vez es la electrónica y en el futuro se apunta como base técnica predominante la biotecnología o la fotónica.

En quinto lugar, abordar el concepto de sostenibilidad material de una forma más serena y profunda, analizando mejor la forma y funcionamiento de todo lo que nos rodea para proponer desde la arquitectura nuevas opciones creativas pero con una responsabilidad ambiental más trascendental.

En sexto lugar, retomar la posición central del arquitecto como prescriptor de materiales, focalizándose en el reconocimiento de su posición principal como gestor de materiales y regulador de flujos ambientales.

En séptimo lugar, reconocer el propio carácter oportunista de la construcción y las reglas técnicas en que se basa la oportunidad. Nunca se ha construido igual, ni en el tiempo ni en el espacio, porque las disponibilidades de materia, energía y conocimiento han sido siempre dispares. La constructibilidad intenta buscar las bases cognoscitivas de este oportunismo.

En octavo lugar, aventurar qué vectores de evolución van a prefigurar las propiedades futuras de los materiales de construcción y que ya deben incidir en los procesos constantes de toma de decisiones.

Finalmente, y para ilustrar este discurso de carácter reflexivo, se presenta a título de experiencia, el resultado de un proyecto de innovación impulsado por la firma de arquitectos b720 bajo la dirección del arquitecto Pablo Garrido, con el apoyo del CDTI, orientado al desarrollo de un prototipo de fachada ligera y modular de bajo impacto ambiental. El grupo LiTA (Laboratori d'innovació i Tecnología a l'Arquitectura) de la Universitat Politècnica de Catalunya, junto con la consultoría Societat Orgànica bajo la coordinación del arquitecto Gerardo Wadel, se responsabilizaron de la aplicación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para, desde el punto de vista de la prescripción ambientalmente responsable de los materiales, reducir al máximo el impacto ambiental de este prototipo de fachada que está enmarcado en una tipología de fachadas reconocida socialmente por su alto grado de industrialización. El proyecto contó a lo largo de su desarrollo con la participación de importantes firmas comerciales que colaboraron de forma entusiasta con el esfuerzo personal de sus equipos de I+D.

1.1. Materia

El resultado físico de la arquitectura, que son los edificios, es la suma inteligente de tres recursos principales: materia, energía y conocimiento.

El film "¿Cuánto pesa su edificio, Sr. Foster?" dirigido por Norberto López Amado y Carlos Caracas, estrenado en 2010, en su título pone énfasis en este aspecto de la ligereza y la liviandad, parámetro que parece asociado a la arquitectura moderna. Sin embargo, todos los estudios realizados acreditan que los edificios convencionales tienden cada vez a pesar más por m^2 de superficie útil. Ello es así probablemente por:

- el aumento de sus prestaciones,
- el incremento de la densidad de los materiales empleados, especialmente los asociados a funciones de resistencia,
- el aumento de su complejidad (más instalaciones, cimentaciones más desarrolladas, mayor estanqueidad, etc.).



Fig. 1. Fotografía de puesto de venta de productos de construcción en una esquina de la ciudad de Hanoi (Vietnam). Enero 2009. Fuente propia.

1.2. Energía

Se conoce con cierto detalle (gracias a los contadores que implantan las empresas de suministro de fluidos urbanos) el consumo energético de los edificios, de forma más o menos diferenciada o agregada, pero aún sabemos poco del monto de la energía invertida en todo el proceso de su construcción, desde la extracción de las materias primeras hasta el día de la inauguración. Una experiencia singular en este aspecto es el proyecto Sirena [1] que implantó la UPC.

1.3. Conocimiento

No se tienen noticias ciertas de cómo se podría medir la complejidad de un edificio de forma cierta. En este momento de la sociedad digital parece que la unidad más adecuada es el byte, puesto que es la unidad habitual que mide la información. Indirectamente los edificios, en su fase de proyecto, están formados por una documentación que los describe y ésta puede ser actualmente pesada en bytes.

Hasta hace poco más de 150 años, los tres factores citados eran notablemente limitados en su extensión y muy lentos de obtener, por lo que la evolución de las técnicas edificatorias al servicio de la arquitectura fue muy pausada a lo largo de los siglos, especialmente si se la compara con la velocidad actual. Las fuentes disponibles de materia, energía y conocimiento eran prácticamente locales por lo que la arquitectura resultante tenía un elevado componente local. Con el inicio de la revolución industrial en Occidente esta situación se modifica substancialmente:

- la materia puede ser extraída, transformada y transportada en grandes cantidades y a grandes distancias,
- la energía puede ser también obtenida, transformada y transportada en grandes cantidades y a grandes distancias,
- el conocimiento, gracias a la diversificación y masificación de los medios de comunicación (prensa, radio, teléfono, etc.) puede viajar a grandes distancias, con gran rapidez y difundirse simultáneamente a los colectivos de profesionales técnicos.

Ante este radical cambio en la disponibilidad de los tres factores citados, la arquitectura que se producirá en el siglo XX va a ser sensiblemente distinta: edificios de mayores dimensiones, construidos más deprisa, con incorporación creciente de materiales sintéticos y nuevas técnicas constructivas que substituirán muy rápidamente al anterior conocimiento constructivo de raíz tradicional atesorado durante siglos.

Este proceso de transformación del sector de la edificación no se ha detenido todavía y la comunidad del sector de la edificación continúa abogando en público y en privado por una mayor e intensa industrialización del sector, puesto que ésta no ha alcanzado aún su total plenitud, como ya se ha producido en el sector de los bienes de consumo.

Sin embargo, en este camino de transformación se ha presentado de forma aparentemente no prevista una nueva circunstancia determinante y que es transversal a los tres factores citados anteriormente: la sostenibilidad, exigencia explícitamente planteada tal como aparece definida en el informe Brundtland de las NNUU de 1987 [2].

En este informe, cuyo contenido y alcance afecta a todas las áreas de la actividad humanas, se hace patente que el planeta Tierra es finito, que la población es creciente, que las aspiraciones de esta población también lo son y que todas las actividades que en él se desarrollan sólo podrán seguir produciéndose (desarrollo durable) en la medida en que sean “sostenibles”, es decir, que no comprometan su continuidad futura. Para un colectivo como la humanidad que aún toma sus decisiones sobre la marcha y según la escala de la memoria de las personas que lo componen, resulta un reto analizar nuestras decisiones actuales a la luz de su continuidad más allá de nuestra esperanza de vida particular.



Fig. 2. Fotografía de obra en marcha en la ciudad de Berlín (mayo 2009). Fuente propia.



Fig. 3. Fotografía de obra en marcha en Senegal (julio 2009). Fuente propia.

2. Contextualización

Ante esta situación actual los proyectistas de arquitectura deben adquirir consciencia global de las repercusiones de sus decisiones y por ello necesariamente, reconsiderar su proceso de toma de decisiones (reducción de incertidumbres) en cualquier nuevo proyecto para acomodarlo a esta nueva situación de consciencia y actuar con una mayor responsabilidad social.

Cuando un arquitecto traza una línea en un dibujo y adjudica a esa línea un valor material (pared, techo, aplacado, conducto, etc.), inmediatamente en algún lugar incierto y alejado de nuestro planeta se moviliza como

consecuencia un complejo proceso técnico y económico consistente en:

- extracción y transporte de materias primeras hacia las plantas de transformación,
- transformación inicial de las materias primeras y almacenamiento como pre-elaborados,
- transporte de los pre-elaborados hasta las factorías de elaborados, donde se convertirán en productos de la construcción y se estocaran hasta su distribución,
- ensamblaje de los productos para formar sistemas constructivos, bien en talleres de post-elaboración o bien a pie de obra.

A lo largo de esta cadena de acciones, se ha ido valorizando la materia mediante la incorporación de energía y conocimiento hasta conseguir unos elementos constructivos altamente especializados y con altas prestaciones. Por el camino recorrido se han ido dejando multitud de residuos gaseosos, líquidos y sólidos que son expulsados de la cadena de valorización y aparcados en vertederos para su confinamiento.

Al cabo de poco tiempo, nuestra rápida, ejecutiva y pragmática sociedad derriba total o parcialmente el edificio construido con aquellos productos, retirando por derribo la materia desvalorizada y trasportándola hasta un vertedero para su confinamiento.

El resultado obtenido a corto plazo ha sido altamente eficaz y ha permitido atender con rapidez las necesidades de edificación de buena parte de la población de nuestro planeta, especialmente motivados por las guerras mundiales y los extraordinarios procesos de emigración y concentración urbana. Sin embargo, esta práctica ha empezado a encontrar sus propios límites y está en peligro su propia continuidad:

- no es sostenible porque las cifras indican que no satisface aún las necesidades de tota la población del planeta sino sólo de una parte de ella,
- no es sostenible porque las fuentes de energía y materia más fácilmente disponibles se van agotando y el coste económico de su disponibilidad va creciendo sin detenerse, limitando su uso universal,
- no es sostenible porque en poco tiempo, toda la materia, junto con el conocimiento y la energía aplicada a su transformación y valorización, acaba confinada en un vertedero, almacenada de tal forma que no se puede volver a utilizar.

Para ser más conscientes de esta dinámica se recomienda consultar una reciente Tesis Doctoral [3] donde se analiza, mediante el método de análisis de flujos, cuál ha sido recientemente la dinámica cuantitativa de los materiales de la construcción, considerando como ámbito físico el de la provincia de Lérida.



Fig. 4. Fotografía de una cantera en explotación en la provincia de Burgos. Fuente propia.



Fig. 5. Fotografía de sacos de cemento cola acopiados en una obra de rehabilitación. Fuente propia.

3. Bases

Proporcionar habitabilidad a los ciudadanos, sus pertenencias y sus actividades, continúa siendo el FIN de la arquitectura y lo que justifica la existencia y continuidad de esta disciplina. Para ello, los arquitectos aplican todos sus conocimientos disponibles provenientes de las áreas científicas, técnicas, sociales y artísticas.

La industrialización de la edificación se presenta actualmente como el mejor MEDIO para alcanzar dicha habitabilidad puesto que pone el acento en la definición de procesos intensivos y eficientes que permiten materializar dicha habitabilidad de forma que sea alcanzable por una mayoría de ciudadanos a un coste asequible.

La sostenibilidad se presenta como el REQUISITO indispensable para que esta actividad constructiva no cese, se renueve, crezca en complejidad y se despliegue de forma continuada según el patrón de la perdurabilidad.

Si se analiza someramente la actual actividad “industrial” del sector de la construcción de la arquitectura desde esta triple óptica, ésta se presenta como una actividad aún precaria e ineficiente, discontinua, con muchos “cabos sueltos” técnicos por resolver y que aborda sus conflictos a corto plazo, de forma local y parcial. Probablemente, la resolución de esta situación insatisfactoria no se puede alcanzar de forma inmediata y simple, ni tampoco puede encomendarse sólo a los arquitectos y a sus materiales. Se trata en definitiva de una pregunta que interpela a toda una sociedad.

La especialización y compartimentación del conocimiento ha hecho pensar a todos los ciudadanos que cada problema podía ser confinado y ser confiado a un experto que le aplicaba la solución más pertinente. La experiencia de las sucesivas crisis económicas, sociales y ambientales de la última década ha convencido, también a los arquitectos, que los problemas son terriblemente transversales a pesar de que la capacidad de intervención de cada técnico proyectista se limita siempre a un caso particular.

4. Habitabilidad

La arquitectura construida debe proporcionar habitabilidad mediante la construcción de espacios materiales que se hallan dentro de los edificios o fuera de ellos. Al hablar de la habitabilidad que se presta fuera de los edificios se concierne a la ciudad y a los servicios de habitabilidad que ésta presta. El concepto de habitabilidad permanece pero aquello que comprende no es estable sino que evoluciona. Muy probablemente, el servicio de acceso a internet por *wi-fi* sería considerado por algunos colectivos como algo inherente a la habitabilidad espacial pero resulta evidente que su disponibilidad es relativamente reciente. La habitabilidad es un amparo amplio porque abarca la necesidad de satisfacer:

- necesidades, tanto privadas como sociales,
- funciones que las diferentes culturas van implementando,
- aspiraciones personales de los sujetos y de los colectivos con los que se sienten identificados.

Hoy en día conviven en nuestro planeta Tierra muchos modelos de habitabilidad, claramente diversos según la intensidad de recursos aplicada, su flexibilidad de reconfiguración, el grado de socialización, etc. No es el mismo servicio el que se presta a un enfermo que a un viajero que a un pescador en campaña en alta mar.

El reto futuro para la arquitectura en las próximas décadas será aportar a todos los ciudadanos una habitabilidad digna y accesible a la mayor cantidad de población y con la mayor eficiencia de recursos. A lo largo del día, en nuestra vida cuotidiana transitamos por diversos edificios especializados (residencia, movilidad, trabajo, ocio, consumo, sanidad, educación, etc.) que nos prestan la habitabilidad necesaria para desarrollar diversas actividades. El conjunto de m^2 de superficie arquitectónica al servicio de cada ciudadano crece constantemente junto con nuestras aspiraciones (bibliotecas, polideportivos, segunda residencia, etc.) y como consecuencia crece también la cantidad de material, energía y conocimiento que inmoviliza nuestra sociedad en forma de arquitectura. No se trata pues únicamente de un problema técnico sino también de un problema social.



Fig. 6. Fotografía interior de una cocina rupestre medieval en el sur de Francia. Fuente propia.



Fig. 7. Fotografía interior de una cocina actual. Fuente propia.

5. Industrialización

Los arquitectos tienden a identificar la industrialización con la apreciación de sus resultados (análisis anatómico) sin considerar sus flujos (reconocimiento fisiológico). Los flujos en la construcción tienden a ser discordantes y ello conlleva disfunciones en un sector que no es fácil de regular y acomodar. Los flujos de la producción industrial aspiran a ser constantes, como el ciclo del agua en los climas templados. Sin embargo, y siguiendo con el símil fluvial, los flujos del sector de la construcción se asemejan a menudo al ciclo del agua en los climas mediterráneos donde los periodos de sequía se alternan con las inundaciones.

Industrializar es aplicar un método sistemático y reiterativo a la producción de bienes o servicios para conseguir la mayor eficiencia posible, es decir, el mejor producto al mejor coste. Para ello es imprescindible:

- definir claramente el objetivo que se desea producir y con qué nivel de calidad y prestaciones,
- diseccionar, segregar y especializar los procesos de producción que conducen a ese objetivo,
- incorporar constantemente a dichos procesos nuevos conocimientos alternativos que permitan una mayor eficiencia.

Las formas que hasta ahora conocemos de industrialización (tecnologías intensivas, grandes producciones masivas, procesos ininterrumpidos, etc.) son sólo algunos ejemplos de formas de industrialización concretas que han prosperado en un entorno social marcado por:

- necesidades masivas y poco exigentes de bienes y servicios (como las que se producen tras una guerra o por una intensa emigración),
- tecnologías disponibles que son rígidas y muy intensivas en el uso de recursos,
- facilidad de transporte.

El éxito reciente y acreditado de estos modelos ya conocidos de industrialización ha perdurado mientras ha perdurado dicho entorno. En un nuevo entorno que se avecina lenta, pero inexorablemente, se modificará la facilidad actual de transporte, la rigidez de las tecnologías conocidas y las necesidades serán más cualitativas que cuantitativas. ¿Qué ha sucedido mientras tanto en el sector de la edificación?

El sector de la construcción es y ha sido, por naturaleza, poco masivo. La demanda es muy diferenciada y dispersa, las tecnologías para poder ser aplicadas "in situ" no pueden ser muy rígidas y el elevado peso de sus componentes constructivos no favorece, en la mayoría de los casos, el transporte a grandes distancias.

Todo ello ha propiciado que, salvo contadas excepciones en el tiempo y el espacio, la producción mayoritaria del sector de la edificación se haya reconfigurado constantemente pero sin abordar de forma decidida y explícita una plena y profunda industrialización.

Las tecnologías aplicadas a la edificación son cada día más complejas (mayores conocimientos implicados), más eficaces (se alcanzan mayores logros) e intensivas en recursos (material, energía y tiempo) pero sin alcanzar una plena industrialización. Además, a ello se añade que los técnicos de cabecera del sector, los arquitectos, no son, por formación, expertos en industrializar procesos porque este método no ha estado presente en su formación académica y porque desde antaño su óptica está orientada al resultado final más que al proceso artificial que permite alcanzarlo. Mucha síntesis.

No existe pues un único escenario para la industrialización: en Europa y más concretamente en España, se plantea actualmente un nuevo escenario para la futura industrialización marcado por las siguientes características:

- no existen actualmente en el entorno inmediato europeo necesidades cuantitativas de habitabilidad, sino más bien cualitativas y además son de signo muy diversificado (población de edad más avanzada, mayor peso de la inmigración, nuevos modelos de trabajo y ocio, nuevas formas de convivencia familiar, etc.),
- la fácil disponibilidad de los actuales recursos básicos, tanto en materia como en energía, se verá pronto muy limitada (menos petróleo, menos dinero, menos agua, menor autoridad de Europa, etc.) y cada vez será más complejo extraer y transportar dichos recursos desde ubicaciones lejanas,
- la falta de un sistema común de conocimiento técnico compartido en el sector de la edificación, que le otorgue fiabilidad, flexibilidad y cohesión. Por este motivo al sector de la edificación le cuesta aprender de sus errores, le cuesta aprender de abajo a arriba (del operario al arquitecto) y también de arriba a abajo (del arquitecto al operario) y además le cuesta establecer alianzas estables que le impidan desangrarse en conflictos internos.

Si en nuestro entorno más próximo la demanda social de edificación está poco formada, si cuantitativamente es débil, si está atomizada y además se está reconfigurando rápidamente en sus necesidades y aspiraciones, es razonable pensar que las recetas más convencionales de la industrialización (producción masiva, continuada y rígida) no serán capaces de relevar inmediatamente la construcción más convencional basada principalmente en la tradición. Aquellas iniciativas industrializadas que aspiren a prosperar los próximos años deberán ser altamente innovadoras, flexibles y reconfigurables para pequeñas series.

Todos los que forman parte como eslabones de la cadena del sector de la construcción formulan la misma aspiración: industrializar el sector. Esta aspiración más bien parece un deseo de disfrutar de las mismas prebendas que los sectores industriales: trabajo continuado y bajo techo, en grandes series de productos de baja duración que son expedidos hacia cualquier parte del mundo.



Fig. 8. Fotografía de módulo de fachada ligera en taller, listo para su expedición hacia la obra. Fuente propia.



Fig. 9. Fotografía de adobes de arcilla en Senegal, listos para su expedición hacia la obra. Fuente propia.

Para alcanzar este escenario o uno asemejable hay que plantear una industrialización integral del proceso de producción de la arquitectura. No se puede industrializar por partes, hay que abordar los aspectos que se mencionan a continuación.

5.1. Industrialización del Proyecto

La elaboración de los proyectos de arquitectura continúa siendo una labor artesanal, intensa y esforzada por parte del autor, donde se toman importantes decisiones materiales en muy poco tiempo y sobre bases de conocimiento poco sólidas: ¿cuál es la demografía, el uso, la explotación, el medio físico, las alternativas, etc. que circunstancian cada proyecto? Tal vez incluso ciertas cuestiones e informaciones debieran abordarse en la fase de encargo. Ello conlleva necesariamente que, finalmente, muchas obras de edificación cuesten más de lo previsto, se acaben tarde y no lleguen a satisfacer las expectativas de sus promotores.

5.2. Industrialización del proceso de construcción de la obra

Los procesos de construcción de las obras de edificación son aún, en general, lentos e ineficaces, generadores de ruido y residuos, poco precisos y necesitados de ulteriores repasos, ajustes y correcciones. Ello es así porque los tiempos muertos son muy elevados, porque no existe habitualidad de cooperación entre los participantes y porque en definitiva, están poco implicados mutuamente en la calidad final. La tendencia más común de las soluciones planteadas ha sido desviar el mayor número de actividades parciales hacia procesos en fábrica para reducir la obra a un mero ensamblaje de componentes acabados. Esta solución tiene como premio una mayor fiabilidad pero exige en contrapartida una intensa cooperación de los participantes a nivel de conocimientos en las fases previas al montaje, cooperación que demanda tiempo y liderazgo intelectual, recursos poco coincidentes en la construcción convencional.

5.3. Industrialización de la gestión de los edificios en fase de explotación

El actual parque edificado en explotación empieza a ser una entidad considerable desde el punto de vista volumétrico, material, social y energético. Este ingente entorno artificial, el denominado “medio construido”, no se está explotando ni gestionando de una forma armónica, coherente, ni con criterios profesionales. Sólo una mínima parte del millonario parque de edificios en el estado español está bajo las manos de técnicos profesionales cuyo objetivo es mantenerlos y administrarlos con criterios de explotación. El evidente volumen de edificios semivacíos, de uso intermitente o parcial, dispuestos de forma inconexa en el territorio, deteriorados y sin un futuro cierto, configuran una visión notable en nuestra geografía construida que merece un esfuerzo de estudio y puesta en valor semejante al que se aplica a otras infraestructuras como las asociadas a la salud, la movilidad o la educación. Un tratamiento adecuado de los edificios durante su ciclo de vida y unos planes de reconversión y reciclaje realistas permitirían generar una demanda técnica sobre el sector de la construcción no sólo en el momento de la construcción sino a lo largo de toda la vida de un edificio.

Tal vez el subsector productivo de la construcción menos industrializado es actualmente el de la rehabilitación. Ello dificulta notablemente su expansión, aun existiendo una demanda latente importante y cuantificada. Unos planes de reconversión y renovación realistas permitirían generar una demanda técnica sobre el sector de la construcción no sólo en el momento de la construcción sino a lo largo de toda la vida de un edificio.

5.4. Industrialización de los productos de construcción

Probablemente, el subsector de la edificación que más se ha industrializado ha sido el de la fabricación de los materiales y productos de construcción. El gran

conocimiento atesorado, las importantes inversiones realizadas, los intensos procesos de acreditación y homologación aplicados, el tejido empresarial y asociativo generado, etc. superan con mucho al resto de subsectores. Tal vez, ello ha sido motivado por su gran relación con industrias de otros estados y continentes que le han aportado capital, conocimiento y materias primeras.

5.5. La industrialización no se detiene

Así pues la industrialización alcanzada por la edificación es aún poco intensa, muy parcial y en progreso. Los ejemplos que se citan como industrialización son aún puntuales, efímeros y más bien trasposiciones de logros nacidos en la industria de bienes de consumo. Sin embargo, la industrialización no se detiene porque no es una meta de llegada sino un camino. La industrialización es, por definición, un proceso de mejora continuada. Las más modernas técnicas industriales de mejora continuada de procesos son las denominadas técnicas LEAN [4], orientadas a la mejora continua de procesos.

5.6. El salto de la innovación

El conocimiento técnico aplicado, inédito y substitutivo, ha sido el motor del desarrollo de los actuales productos de la construcción a lo largo del S. XX [5] [6]. Estos últimos siglos se han caracterizado en Occidente por el auge de la substitución de la tradición por la innovación. Hoy en día, cuando se compara el comportamiento de dos técnicas de diferente edad siempre se supone que, por la ley del progreso, la más reciente es siempre la más adecuada. Este prejuicio, plenamente arraigado en nuestra vigente admiración por todo lo que es nuevo, no ha sido, hasta hace relativamente poco, el valor predominante. La tradición contrastada y avalada por los profesionales senior estaba siempre por encima de las nuevas propuestas realizadas por los profesionales júnior que debían correr con la carga de la prueba. Los medios de comunicación de masas han jugado un importante papel en la modificación de las bases de este paradigma y también en los hábitos de prescripción de los técnicos de la edificación.

Para que el lector sea más consciente de la intensidad de la renovación que ha sufrido este sector se sugiere la consulta de un reciente Trabajo Fin de Máster (TFM) donde se estudia el archivo de proyectos de la promotora social de viviendas del Ayuntamiento de Barcelona desde la posguerra civil española hasta la actualidad con el fin de analizar el proceso de substitución de los sistemas constructivos tradicionales (el muro portante de obra de fábrica, la ventana de madera, el forjado de viguetas metálicas o los desagües de plomo) por los nuevos sistemas constructivos (estructuras porticadas de hormigón armado, ventanas de aluminio o desagües de PVC). El estudio aporta un interesante dato cuantitativo: en el periodo estudiado los edificios de viviendas (tipología acusada siempre de ser altamente refractaria a la innovación) han modificado totalmente dos veces todos sus elementos constructivos.

En los últimos 50 años los edificios de viviendas han visto renovarse totalmente su composición material, abandonando prácticamente en su totalidad el uso de los materiales próximos y accesibles que durante milenios han sido la principal fuente de suministro. Los productos que los han substituido están fabricados, en buena parte, con materiales lejanos tanto en superficie como en profundidad. La substitución constante y competitiva de un material por otro ha sido uno de las dinámicas más incesantes y recientes del sector, fuertemente auspiciada por la publicidad como rectora de la opinión [8].

Como referencia histórica, no publicada, pero si consultable en los archivos del Port de Barcelona, se recomienda el proyecto del Almacén de los Depósitos Comerciales de Barcelona del año 1881 del ingeniero Sr. Mauricio Garrán. Aparte de los acertados contenidos de este edificio, que en la actualidad puede ser visitado fácilmente, pues es la sede del Museo de Historia de Catalunya, se puede consultar toda la documentación original del proyecto. Especialmente en los textos escritos (memoria, mediciones, presupuesto y pliego de condiciones) se puede leer los intensos esfuerzos realizados por el autor del proyecto para encontrar, seleccionar, transportar y sufragar los materiales necesarios para la construcción. En un entorno de 130 años atrás, sin internet, sin marcas comerciales, sin autopistas, camiones ni prácticamente ferrocarriles, se cita en la memoria las gestiones realizadas por el ingeniero en los bosques del alto pirineo concertando a pie de bosque los árboles a talar y su transporte, fluvial y finalmente marítimo, hasta el puerto de Barcelona.

6. Construcción Sostenible

Los procesos productivos y los resultados artificiales finalmente generados por la construcción humana han de estar, como requisito, en sintonía o integración con los correspondientes procesos de la realidad natural del planeta para no interferirlos, entorpecerlos y evitar propiciar su deterioro irreversible.

Hasta hace muy poco la naturaleza era considerada por el hombre técnico como una caja que nos contenía pero que se presentaba como cerrada, inaccesible y de la que se recibían más agresiones que beneficios. El conocimiento técnico desarrollado por occidente a lo largo de la revolución industrial ha permitido desbloquear las cerraduras de esta caja y apoderarse directamente de sus recursos de capital para satisfacer nuestra habitabilidad. Sin embargo, la contabilidad ambiental nos está alertando que la velocidad con la que la humanidad se está apoderando de estos recursos y la torpeza con la que lo está haciendo está poniendo en seria duda la continuidad de este proceso. Las actuales tecnologías se basan en procesos finitos no renovables y deben ser substituidas los próximos años por tecnologías más adecuadas.



Fig. 10. Fotografía de edificio en construcción en Hanoi (Vietnam) con andamios de bambú. Fuente propia.



Fig. 11. Fotografía de planta de caña de bambú en Casamance (África Occidental). Fuente propia.

Pero el problema no es sólo cualitativo sino cuantitativo. El volumen de materia, energía y conocimiento que actualmente está en circulación en nuestro planeta es tan elevado que resulta difícil hallar, desarrollar y poner en explotación comercial nuevas tecnologías capaces de sustituir cuantitativamente a las actuales, detener así el deterioro y empezar a reintegrar el capital expoliado. Parece pues que las prácticas R (reducir, reutilizar y reciclar) deberán ser aplicadas en paralelo al desarrollo de las tecnologías de sustitución hasta que éstas puedan entrar en carga por sí mismas y proporcionar habitabilidad sin deteriorar el capital de recursos disponibles en el planeta.

El reto técnico que se plantea actualmente no es por tanto sólo alimentar la existencia y fomentar la creación, sino perdurar, es decir, construir con un vector de proyección en el futuro. Al proyectar y construir un edifico, la mayoría de los agentes implicados en su concepción y materialización sólo piensan en el día de su inauguración sin documentar su proyección al cabo de 20, 30 ó 50 años.

6.1. Reducir

El volumen de los recursos materiales y energéticos aplicados a la habitabilidad ha aumentado fuertemente y ha permitido alcanzar unas cotas de confort nunca antes soñadas. Sin embargo, este aumento de la intensidad de recursos movilizados está poniendo en peligro su propia continuidad: los datos aportados por los expertos alertan que no parece posible proporcionar la misma habitabilidad a todos los habitantes del planeta ni durante una infinidad de tiempo. ¿Es posible pues reducir esta intensidad y al mismo tiempo mantener la calidad de la habitabilidad, haciéndola accesible a más ciudadanos por más tiempo? ¿Es posible desmaterializar y *desenergizar* la construcción de la arquitectura sin afectar la calidad de la habitabilidad prestada? ¿Esta reducción debe realizarse en los diversos procesos unitarios de producción de la habitabilidad (soluciones tecnológicas), uno a uno, o en los procesos de explotación (soluciones de gestión)? En general, las altas intensidades de materia y energía asociadas a los procesos actuales de producción contrastan con las bajas intensidades de los procesos de explotación (¿cuánto tiempo se está en cada edificio?, ¿cuánto tiempo se viaja diariamente en automóvil?, ¿cuánto tiempo al mes usamos cada camisa?).

En general, los procesos de producción habituales tienden a ser "económicos" (ajustados monetariamente) pero no necesariamente los procesos de consumo final por parte de los ciudadanos. Los tiempos de uso real, en términos absolutos, tienden a ser bajos en comparación con los tiempos iniciales de elaboración y finales de reciclado. Por tanto, probablemente los procesos de reducción deberán abordarse a diferentes escalas:

- *macroreducción* (a nivel de edificio),
- *mesoreducción* (a nivel de sistema constructivo),
- *microreducción* (a nivel de material).



Fig. 12. Conjunto religioso rupestre en la provincia de Burgos.
Fuente propia.

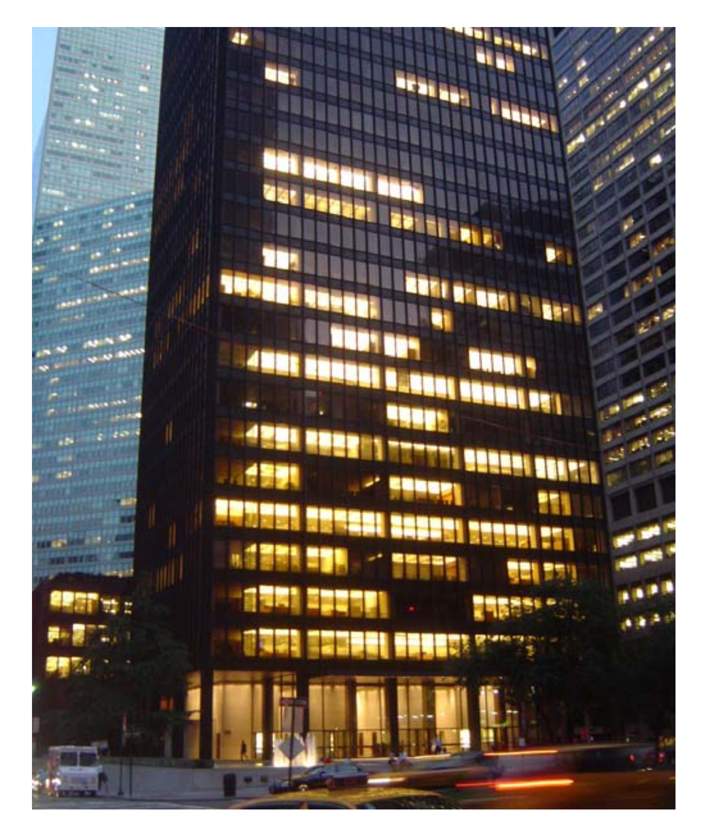


Fig. 13. Fotografía de conjunto al anochecer del edifico Seagram.
Fuente propia.

6.2. Reciclar

Hasta la actualidad, la actividad del hombre constructor, "*Homo Faber*", ha consistido siempre en transformar la realidad de los materiales en una misma dirección, como si de un "Big Bang" se tratara. Sin embargo, el modelo que aplica la naturaleza en el planeta Tierra en el que estamos instalados es básicamente un entorno cerrado, que se desarrolla hacia una complejidad creciente como una rueda de un vehículo: avanza porque se cierran constantemente los ciclos.

Los ciclos de los primeros materiales de la antroposfera se cerraban solos porque estaban inseridos en los ciclos naturales perdurables de la biosfera que los contenían. En estos momentos el hombre constructor ha generado diversidad de nuevos ciclos materiales que (como el de la cerámica, el del aluminio, el del petróleo, etc.) son aún imperfectos porque no están cerrados y por ello generan desequilibrios ambientales crecientes que están alterando nuestro medio ambiente generando anomalías en perjuicio de la vida de todos los ciudadanos. ¿Cómo practicar el reciclaje de los materiales, los productos o los sistemas constructivos?

Reciclar ha sido durante siglos la alternativa mejor porque extraer y transformar era complejo, lento y duro. A lo largo de la revolución industrial y muy especialmente con la generalización en Occidente de las sociedades de consumo se han invertido los procesos y reciclar se ha convertido en algo complejo, caro y minusvalorado.

La tecnología que hemos desarrollado recientemente se ha especializado en generar procesos de producción material unidireccionales basados en la consideración que la responsabilidad del productor termina en el momento de la venta.

A este fenómeno amplio se le superpone un fenómeno específico de la construcción que es la mayor vida útil de la mayoría de los materiales implicados, vida que tiende a superar a la vida legal de las empresas que los produjeron. Sin embargo, existe un importante subsector de la construcción, el de la renovación de los interiores, que genera una actividad con ciclos de usos mucho más cortos y que implica materiales con un alto valor material y energético añadido.

Se plantean pues unas preguntas de hondo calado técnico: ¿es posible reciclar los materiales de construcción sin perder habitabilidad?, ¿es posible reciclar sin obtener un nuevo producto de calidad inferior?, ¿es posible aumentar el porcentaje de material útil tras un reciclado o siempre existirán mermas? [9] [10]

Probablemente por tanto, los procesos de reciclaje deberán abordarse también a diferentes escalas:

- *macroreciclaje* (a nivel de edificio),
- *mesoreciclaje* (a nivel de sistema constructivo) [11],
- *microreciclaje* (a nivel de material) [12] [13].

6.3. Reutilizar

El técnico de la edificación, sea promotor, proyectista, facultativo u operario, es un profesional que ha sido modelado y educado para producir un bien, en este caso el edifico, sin focalizarse en el servicio que dicho bien presta.

Estableciendo una comparación con el sector de la alimentación, la construcción de edificios está aún focalizada en la fase primaria agropecuaria pero poco evolucionada hacia la gastronomía o la nutrición. Disponer de una visión en perspectiva de la actividad que cada uno de nosotros realiza diariamente nos debe permitir una mejor

toma de decisiones y abordar ciertos problemas con mayor capacidad. Uno de estos retos técnicos aparentemente inabordables es el de la reutilización.

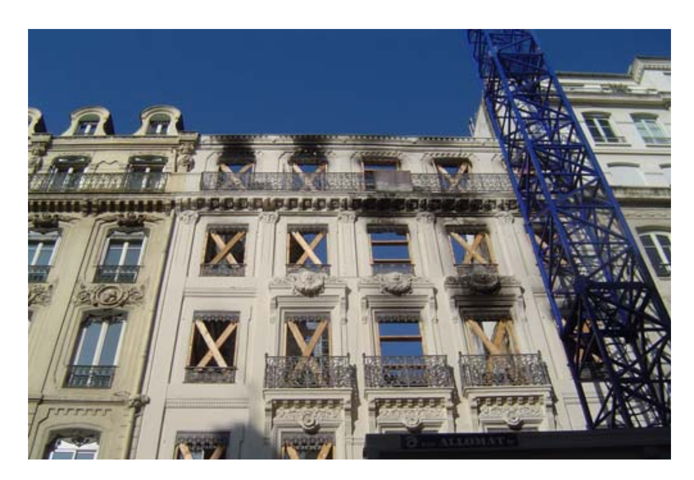


Fig. 14. Fotografía de fachada para su conservación tras el derribo de su edificio posterior en la ciudad de Lyon (2009). Fuente propia.



Fig. 15. Fotografía de la catedral de Siracusa construida sobre un antiguo templo griego; las columnas dóricas se manifiestan inseridas en los paramentos laterales. Fuente propia.

La reutilización individualizada de productos o sistemas en edificación (*mesoreutilización*) es una práctica muy poco desarrollada, tanto desde el punto de vista técnico como de su gestión. Solamente tiene una expresión comercial muy reducida en el ámbito de los elementos artísticos de los edificios que en algunos casos son recuperados y reintroducidos en el sector como objetos singulares de anticuario (dinteles, barandillas, chimeneas, alicatados, etc.). ¿Es posible plantear una reutilización a mayor escala de elementos no singulares?

Plantear un banco de materiales, productos o sistemas constructivos reutilizables requiere de un análisis previo del potencial de cada elemento constructivo y de una práctica constructiva que facilite su extracción (adecuado diseño de las uniones) y transporte al punto de distribución. Existen algunos casos de buenas prácticas que podrían servir de base para el desarrollo de este potencial:

- Banco de mermas (*outlet*): en los procesos habituales de distribución y puesta en obra de los productos de construcción siempre quedan pequeñas series de productos por estrenar que no llegan a colocarse en obra. La entidad “Arquitectos Sin Fronteras” promocionó un banco con este perfil de productos. Esta iniciativa tiene un doble valor: aumentar la reutilización de los productos y al mismo tiempo paliar necesidades de colectivos o individuos desfavorecidos.
- Alquiler de productos de la construcción en el sector de oficinas: este sector tiene una alta movilidad por lo que es habitual de los procesos de alquiler. En estos procesos no se ofrecen tan solo los espacios sino que se pueden alquilar muebles, alfombras, mamparas, etc. Cuando finaliza el periodo de alquiler acordado el elemento constructivo (alfombra, mampara, etc.) vuelve al taller para su mantenimiento y próximo alquilado.

La reutilización de conjunto (macroreutilización) sí que está mucho más extendida en el campo de la edificación en el estado español, especialmente en el sector residencial. Son muy pocos los edificios residenciales que son finalmente derribados o abandonados. En el futuro parece que estas cifras serán aún más pequeñas porque la generalización de los sistemas de propiedad horizontal y por el cese de la emigración del campo a la ciudad. Los edificios parece que acaban siendo finalistas solamente en los casos de fuertes reconversiones, sean a escala urbana o a escala de uso.

En este sentido, la restauración monumental por parte de las entidades públicas está jugando también un papel de monitor al ejemplarizar la puesta en valor del patrimonio edificado pretérito frente a la ambición por lo nuevo que es propio de la sociedad de consumo.

Sin embargo, esta alta tasa de reutilización de los edificios conlleva en paralelo una alta tasa de substitución de algunos de sus elementos constructivos, especialmente las instalaciones, las particiones y los revestimientos interiores. Estos elementos, a pesar de ser marcadamente más ligeros que la obra gruesa, tienen un impacto ambiental unitario mucho más elevado ya que se trata de elementos mucho más elaborados, diversificados y con un ciclo de vida menor.

6.4. Transporte

El comercio ha sido a lo largo de la historia humana una de las actividades más importantes en la dinámica de las civilizaciones. La distribución irregular de las materias primeras y de las elaboradas a lo largo del planeta ha generado altos diferenciales de potencial que han motivado la movilización de grandes cantidades de energía y conocimiento para transportar estos bienes exóticos preciados hasta grandes distancias.



Fig. 16. Fotografía de camión de transporte en África Occidental. Fuente propia.



Fig. 17. Fotografía de transporte fluvial de mercancías en el puerto de Rótterdam. Fuente propia.

La alta disponibilidad de energía barata a lo largo del siglo XX ha propiciado que viajaran cantidades crecientes de mercancías, pero no ya por su exotismo sino por su precio diferencial en el mercado gracias a los desequilibrios sociales del planeta. Algún trabajo académico ya ha abierto la puerta a la observación, de forma simplificada, de casos reales sobre la importancia actual del transporte y de la energía asociada [14].

Sin embargo, el transporte en sí no genera ningún valor ambiental añadido puesto que el valor físico y absoluto de un material no se modifica por muchos kilómetros que se recorran. Se trata pues de una variable que hay que reducir necesariamente desde la perspectiva de la sostenibilidad. En un mundo futuro de recursos lejanos y probablemente escasos (disputables), los recursos que sean más cercanos y que sean consumidos moderadamente otorgarán competitividad a los grupos sociales que los movilicen con tecnologías adecuadas.

7. Prescripción

¿Qué papeles juega el arquitecto en este terreno donde materia, energía y conocimiento se conjugan para proporcionar la habitabilidad de sus conciudadanos? Uno de los roles ambientalmente más relevantes pero que pasa desapercibido por todos, es el de prescriptor de materiales, productos y sistemas de edificación.

El arquitecto al especificar en el proyecto las diversas partidas que lo componen, protagoniza en buena parte la demanda de materiales, productos y sistemas de la edificación. Para realizar una correcta prescripción el arquitecto debería poseer una sólida información sobre las propiedades absolutas de los materiales [15], sus valores relativos [16] y su reciente evolución [17]. Los materiales, productos y sistemas de la edificación no han sido siempre los mismos sino que siguen una evolución de conjunto a través de diversos estadios identificables:

1. Materiales emergentes: a través de la publicidad, la emulación o el ansia social de novedad, confundida a veces con la originalidad, se presentan estos nuevos materiales con el respaldo de la “solución a todos los problemas actuales”. A lo largo del siglo XX se han abierto tres nuevos frentes de nuevos materiales:

   - Materiales de síntesis: materiales no pre-existentes en el entorno natural y que son sintetizados por procesos físico-químicos.
   - Materiales “composites”: mezcla de materiales ya existentes para obtener propiedades conjuntas nuevas.
   - Materiales nanomodificados: la modificación de los materiales históricos a escala nano permite manipular en la dirección de la corrección ciertas propiedades no deseadas.

   El periodo temporal transcurrido entre el desarrollo de un nuevo material y la puesta en el mercado de un nuevo producto o sistema constructivo no es inmediato puesto que requiere un proceso de desarrollo, de acreditación y de gestión.

2. Materiales maduros: aquellos que ocupan la parte principal, cuantitativa y cualitativamente, de la oferta puesto que han adquirido el grado de “commodities”, es decir ser la base común, por precio, disponibilidad y características, de la mayoría de los productos y tecnologías disponibles y asequibles en la actualidad. La arcilla cocida, el cemento, el acero o el yeso ocupan esta posición. Se trata de materiales de largo recorrido difícilmente substituibles a corto y medio plazo.

3. Materiales en declive: materiales que han ocupado en algún momento histórico la posición central en el sector y que ahora son residuales porque alguna de sus propiedades apreciadas antaño ha pasado a ser un handicap limitante. Madera, piedra, barro o cal han sido algunos de estos materiales. Las nuevas tecnologías han vuelto a intervenir sobre estos materiales para modificar



estas propiedades limitantes (reducir su peso, aumentar su durabilidad, acelerar su endurecimiento, etc.) para recuperar su presencia central.

MOSAICO DE HULE
"De Luxe"
Goodrich-Euzkadi
Eterno
Limpio
Cómodo
Elegante
Económico
Compañía Hulera Euzkadi, S. A.
MEXICO, D. F.

Fig. 18 y 19. Revista Arquitectura (México) , nº 30.



La prescripción que realiza cada día el arquitecto no es una prescripción libre sino que se halla fuertemente condicionada por circunstancias de oportunidad:

- conocimientos e información disponible sobre los materiales ofertados,
- capacidad económica de compra,
- tradición y experiencia histórica en su uso,
- disponibilidad cuantitativa y accesibilidad por transporte,
- compatibilidad con el resto de la obra,
- valores intangibles asociados.

Cada vez que el arquitecto prescribe un material, en el marco de las circunstancias anteriormente citadas, su demanda presiona a la oferta con el fin de que se extraiga un material, se transforme, se conforme como producto, se transporte y se ponga en obra. En general, el arquitecto no posee esta percepción de su poder de compra y actúa, generalmente, como si sus decisiones fueran ambientalmente neutras. El concepto "compra ambientalmente responsable" debería instalarse en la prescripción pero de una forma rigurosa evitando el fácil recurso del marketing a las categorías "eco".

Una prescripción ambientalmente responsable debe presionar no tan solo sobre las fuentes de materiales sino sobre la eficiencia de sus procesos de transformación, transporte, puesta en obra y reciclaje. En este sentido, materiales muy "ecológicos" pierden parte de su bondad en procesos ineficientes donde se desperdicia material, agua y energía. Por el contrario, otros materiales poco "ecológicos" palian notablemente parte de su impacto negativo aplicando procesos altamente eficientes.

En la era preindustrial el arquitecto prescriptor actuaba con un perfil que ahora se denominaría "Km. 0", puesto que conocía directamente a sus proveedores locales de materiales y también su capacidad concreta de respuesta en términos de logística. De un arquitecto se esperaba incluso una pericia de "ojo clínico" a la hora de admitir la materia primera como si de un cocinero se tratara al examinar un pescado fresco. Un ejemplo no muy lejano de esta práctica se puede apreciar a través de la lectura del *Pliego de Condiciones Técnicas de la Dirección General de Arquitectura,* documento en uso hasta la aparición de las Normas Tecnológicas de la Edificación en la década de los '70 del siglo XX. El texto estaba trufado de sistemas organolépticos para el reconocimiento de la calidad de los materiales. Ello ha perdido totalmente su sentido cuando los materiales llegan a las obras envasados, etiquetados y documentados… pero sin saber su procedencia geográfica.

Actualmente son pocos los arquitectos que aún pueden destinar su tiempo a viajar para conocer de primera mano el origen de los materiales, visitar las fábricas de productos y evaluar en ejemplos de edificios concretos el comportamiento real de dichos materiales en la obra. La red internet es el escaparate de la realidad que ha substituido a la experiencia organoléptica. ¿Cuál es pues el escenario futuro que se prefigura en la relación de conocimiento de los arquitectos con sus materiales?

La necesaria reducción del impacto ambiental derivado del uso irresponsable de los productos de construcción obliga de entrada a los arquitectos a recuperar su proximidad y conocimiento de los materiales de su entorno más inmediato. Para que ello sea factible debe establecerse una relación de complicidad entre la industria próxima al edificio que se va a construir y el arquitecto que va a proyectar y dirigir la obra. La globalización entendida cuantitativamente y no cualitativamente ha permitido que lleguen a nuestras obras productos con vocación de sustituir a los locales y no de complementarlos. Ello produce no tan solo un impacto ambiental en forma de transporte sino que además expolia la tecnología local convirtiendo a las comunidades sociales en dependientes de técnicas y recursos lejanos. Se plantea por tanto que el arquitecto prescriptor debe tener un conocimiento suficiente de la geografía económica de los materiales de construcción que prescribe.

Sin ánimo de establecer comparaciones pero sí de ejemplificar realidades, sorprende que en la península ibérica existan una inmensa variedad y cantidad de recursos líticos y al mismo tiempo, las tecnologías, que tendrían que desarrollar su aprovechamiento en forma de productos, se limiten al laminado para aplacados. El resultado es que en el mercado ibérico las piedras de origen local compiten con otras procedentes de todos los continentes puesto que el laminado valoriza preferentemente el valor estético por encima del técnico.

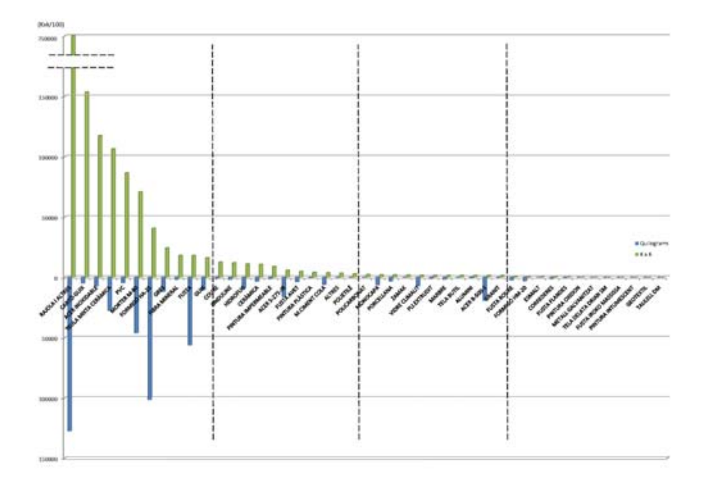


Fig. 20. Gráfico extraído de [16]. En las abscisas se representan todos los materiales presentes en la obra monitorizada. En las ordenadas inferiores el total de su masa. En las ordenadas superiores el total de su masa multiplicado por el total de kilómetros recorrido desde el punto de compra hasta la obra. La reproducción de la gráfica a esta escala no permite apreciar detalles pero sí entender que el impacto del transporte es importante pero se concentra en pocos materiales.

8. Constructibilidad

Si en un futuro inmediato el sector deberá replantearse el perfil de los actuales materiales de construcción a la luz de las exigencias de la habitabilidad, la industrialización y la sostenibilidad, es oportuno plantearse una pregunta de fondo: ¿qué es realmente un producto de construcción? o dicho de otra forma, ¿por qué algunos materiales han llegado a ser productos de construcción y otros no? La industria de los materiales y productos de la construcción parece evolucionar según unas leyes que le son propias y que actúan como modeladores de los vectores de evolución. Este conjunto de leyes, que podrían agruparse bajo el concepto común de "constructibilidad", no siempre es acorde con los criterios de la sostenibilidad. Este autor se atreve a formular algunas de las características que parece atesoran algunos productos y que les permiten ser aptos para la construcción:



Fig. 21. Fotografías comparadas de revestimientos de fachada distintos pero sincrónicos: troncos de madera (Galicia) y piezas prefabricadas de aluminio fundido (Viena). Fuente propia.

8.1. Durabilidad

Los productos de construcción son, comparativamente, de ciclo largo si se les asemeja con el resto de productos de la sociedad de consumo. El periodo de stock de los productos de construcción en los propios edificios es muy alto puesto que se mide en décadas. Para que ello sea posible hay que seleccionar:

- materiales muy estables,
- materiales con fácil mantenimiento,
- materiales de fácil substitución.

Sin embargo, ello está cambiando muy rápidamente. Cada vez hay más materiales incorporados en los edificios de los cuales disponemos de menor experiencia histórica que las expectativas de vida útil que en ellos depositamos.

8.2. Comportamiento fiable

La arquitectura, hasta donde actualmente la concebimos, se caracteriza por ser una realidad muy estable. Aún no parece haber nacido una arquitectura capaz de reconfigurarse voluntariamente de forma controlada en el tiempo en ciclos diarios, mensuales o estacionales.

Es por ello que los materiales que la conforman deben presentar propiedades muy estables dentro del rango de solicitaciones habituales. Dentro de estas propiedades las más valoradas son la estabilidad y la rigidez. Además, se requiere que los valores de estas propiedades presenten la menor dispersión posible demostrando una elevada fiabilidad y predicibilidad.

En épocas pasadas la calidad de los productos de construcción presentaba una elevada dispersión que originaba una gran incertidumbre en su comportamiento. Actualmente los productos de la construcción se presentan agrupados en estadios delimitados por clases. En contrapartida, la potenciación de determinadas propiedades (rigidez, resistencia, impermeabilidad, etc.) ha generado preponderantemente materiales de perfil muy especializado y por ello descompensado, relegando a aquellos materiales armónicos que aportaban diversas propiedades simultáneamente pero ninguna de ellas excelsa.

8.3. Relación óptima coste/servicio

El consumo de materiales por m^2 de superficie útil de edificación es elevado y como el número de m^2 de superficie útil habitable por ciudadano es también alto, el coste de los materiales aplicados debe ser necesariamente asequible. Ello supone siempre un freno para la incorporación en edificación de materiales de alto coste si su valor añadido no es altamente elevado.

8.4. Disponibilidad alta

La cantidad de masa material que necesita la construcción es elevada, aunque esta cantidad está principalmente focalizada en la parte inicial de su vida útil. Por tanto, es aconsejable utilizar materiales de disponibilidad alta y universal como el agua, la arcilla, la madera o el carbonato de calcio. Además en el proceso de transformación de estos materiales, el ratio entre material aportado y material realmente incorporado al producto debe ser alto.

8.5. Mayor productividad en la puesta en obra

Los edificios continúan siendo los objetos más grandes construidos por el hombre y sus dimensiones no parecen haber hallado límite cuando aún se plantean rascacielos de 500 metros de altura y naves industriales de kilómetros de longitud. Ello obliga a construirlos básicamente a pie de obra, por lo que las condiciones circunstanciales del lugar determinan fuertemente los procesos que son posibles. La magnitud de los elementos a manipular y la intemperie determinan extraordinariamente qué procesos de puesta en obra son posibles y cuáles no. En la conformación de los nuevos productos de la construcción pesa a menudo más su idoneidad para una alta productividad en la puesta en obra que sus condiciones funcionales finales dentro del edificio a lo largo de su vida útil.

8.6. Bajo mantenimiento

La vida requiere unos procesos de mantenimiento intensos aplicados en unos ciclos de tiempo muy cortos: alimentación, bebida, limpieza, vestido, movilidad, reproducción, salud, educación, etc. que constituyen unos costes muy elevados y no obviables para los ciudadanos. En este contexto se presiona para que la habitabilidad requiera un esfuerzo de mantenimiento bajo en tiempo y recursos. Para lograrlo se hace una intensa inversión inicial posible en las sociedades sedentarias con recursos excedentarios.

8.7. Especialización y diferenciación

La construcción sigue un intenso proceso de desagregación. Propiedades que antes estaban reunidas en un mismo material, ahora están repartidas en diversos materiales, obligando a colocar capas sucesivas de materiales diversos. Por tanto, cada vez es mayor la especialización y diferenciación de los productos.

La universalidad se va reduciendo a favor de la especificidad: el número de referencias diferentes de producto en un edificio o en un almacén de la construcción no para de crecer, aunque los "principios activos" de dichos productos sean pocos y comunes. Esta creciente diversificación del perfil de los productos ha obligado a reforzar su disponibilidad, lo cual ha tensado los sistemas de logística y distribución de los productos de la construcción.

8.8. Incorporación y compactación de labores

La obra no constituye un entorno de trabajo confortable ni estable por lo que cualquier labor que pueda ser trasladada previamente a un taller, lo será. Especialmente aquellas labores que permitan ganar tiempo y precisión de ejecución, sin restringir por ello la posibilidad de ulteriores acabados diversos. Otra estrategia es el sándwich como ejemplo de compactación de labores y propiedades previamente diferenciadas.

8.9. Rigor dimensional

Conforme aumenta la desagregación de los productos de construcción y estos se diversifican buscando una máxima especialización, aumenta también el número de uniones a realizar entre ellos. Para poder realizar adecuadamente un elevado número de uniones y con un alto grado de eficiencia y calidad, es necesario un máximo rigor dimensional de los productos a unir.

8.10. De material a sistema

Desde el punto de vista de la materialización de la arquitectura, hablar simplemente de materiales de construcción es hablar de algo pretérito. El aumento de la cantidad de energía y conocimiento invertidas en cada

kilogramo de material no ha cesado de aumentar en tres pasos sucesivos:

• *Paso 1: de material a producto* [18] [19]

En prácticamente una generación, los arquitectos han dejado de ver llegar a las obras los productos de construcción a granel para verlos llegar ocultos y preservados en embalajes con instrucciones impresas. Va desapareciendo prácticamente la manipulación a pie de obra de los materiales de construcción y las labores se van focalizando en procesos de montaje.

• *Paso 2: de producto a tecnología* [20]

Aunque a largo plazo el valor de un producto reside en su comportamiento instalado en la obra, existe a corto plazo un valor determinante que es su facilidad de puesta en obra. Los actuales procesos de soldadura eléctrica, de perforado autorroscante, etc. han dejado atrás a las fraguas de herreros que a pie de obra calentaban bulones, fundían bronce o templaban gafas.

• *Paso 3: de tecnología a sistema*

El salto cualitativo por el que probablemente se conocerá a la construcción más reciente será por el desarrollo de sistemas técnicos. Un sistema es un conjunto de soluciones constructivas desarrolladas en torno a una misma tecnología de producto, pensadas para adaptarla a todos los escenarios posibles.



Fig. 22. Fotografías comparadas de revestimientos de materiales simplemente cortados: losas de granito (Oporto) y cortezas de corcho (Amorín). Fuente propia.

9. Prospectiva de los materiales

A la luz de estas constataciones, ¿qué materiales parece que van a adquirir preponderancia o notoriedad los próximos años?

- los materiales que demuestren ciclos de vida cerrados y con bajo impacto ambiental,
- probablemente el aire, por su bajo coste y disponibilidad, tal como demuestran algunos ejemplos de estructuras inflables para puentes,
- los granulados triturados inertes,
- los actuales materiales “commodities” pero modificados nanotécnicamente para corregir y ponderar ciertas propiedades actualmente insatisfactorias; corrosión, impermeabilidad, etc.,
- los textiles, utilizados a tracción, por su elevado ratio de superficie útil/peso.

9.1. Materiales pasivos y materiales activos

La construcción ha sido durante siglos una disciplina muy tectónica donde los materiales se agregaban pasivamente y la geometría compositiva del conjunto garantizaba el equilibrio estático y su colaboración. El siglo XXI ha aportado, entre otros, un gran cambio en esta posición pasiva: los materiales de construcción dejan de estar para empezar a ser. Ser activos significa que los materiales pueden responder por sí mismos, de forma analógica (por sí mismos) o digital (inducida por mecanismos) a las variaciones posibles en las solicitaciones que les plantea su entorno.

La tradicional asimilación de la arquitectura a una disciplina técnica orientada al control de la formalidad geométrica (anatomía) puede ser enriquecida en los próximos tiempos por su capacidad de diseño de procesos de acción/respuesta (fisiología). Se trata aún de procesos incipientes pero que apuntan al aprovechamiento de mecanismos asimilables a los de algunos organismos de la vida. Encogerse, retener CO_2, reflejar calor, etc. pueden ser procesos físicos pero voluntariamente modulables dentro del intervalo de las solicitaciones normales. Estos “tropismos” de los materiales (respuestas “activas” a solicitaciones ambientales o funcionales diversas) pueden ser activados directamente por la solicitación o bien mediante un sistema nervioso del edificio.

Esta “activación” incipiente a los materiales de construcción plantea una evolución en el rol de la materialidad de la arquitectura: cada material es actualmente un “esclavo”, fiero guardián de una propiedad (resistencia, impermeabilidad, etc.) pero puede evolucionar hacia un perfil de administrador eficiente de dicha propiedad en función del entorno. Un ejemplo concreto que lo evidencia es el caso del vidrio fotocromático que modula su transparencia en función de la intensidad de la radiación incidente.

9.2. ¿Materiales sostenibles?

El actual proceso de fabricación de todos los materiales y productos de la construcción tiene un notable impacto ambiental que afecta negativamente el medio ambiente. La extracción del material de su medio natural, su transformación en materia prima y el proceso de fabricación del producto dan lugar a:

- un importante consumo de energía invertido en manipulación, transformación y transporte,
- emisiones de residuos de todo tipo (sólido, líquido y gaseoso), muchas veces tóxicos, contaminantes y potencialmente peligrosos para la salud,
- una disminución de los recursos naturales al no cerrarse el ciclo de vida: inexistencia de flujos estables y permanentes que devuelvan los recursos materiales finalistas hacia las fuentes extractivas.

La sociedad occidental tiende, por tradición, a establecer juicios de carácter "maniqueista" ante cualquier conflicto, como el que nos ocupa, referente a los materiales sostenibles. Este hábito parece que ha llegado también a impregnar el mundo de la edificación y en algún momento parece que todos los arquitectos desean alejar la culpa que sobre ellos recae a través de la prescripción de materiales "puros" (los etiquetados de ecológicos y naturales) y proscribir los materiales impuros (los artificiales). En esta tesitura, los fabricantes de estos materiales etiquetados de "insostenibles" están realizando un extraordinario esfuerzo de redención para "quitarse de encima" esta valoración peyorativa que los expulsa del mercado.

Un tratamiento más riguroso del tema debe llevar a esclarecer que no existen materiales que "per se", es decir, por cuna, sean sostenibles sino que esta cualidad es parametrizable y graduable, y es la consecuencia de un uso responsable y un adecuado comportamiento ambiental del material a lo largo de toda su vida. Esta cualidad debe ser acreditada a lo largo de todo su ciclo de vida mediante el contraste cuantitativo con parámetros reconocidos de valoración del impacto ambiental. Así pues, desde este punto de vista, no tiene sentido alguno calificar de sostenible a un material sino de valorar su *ecoeficiencia*.

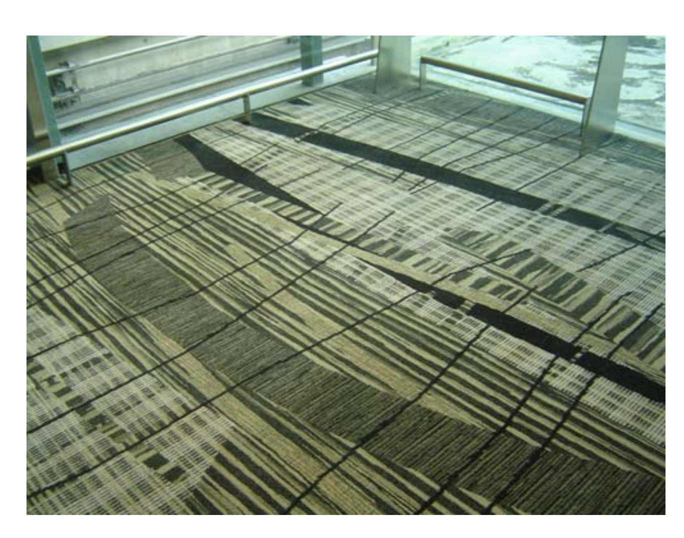


Fig. 23. Fotografía del pavimento de moqueta textil del Aeropuerto de Singapur. Sin entrar a considerar otros aspectos se valora positivamente desde la óptica ambiental su resistencia visual al despaste y a las manchas así como la facilidad de substitución por tramos. Fuente propia.

Resulta evidente que los materiales naturales parten en mejores condiciones iniciales de impacto ambiental respecto de los artificiales porque su propia perdurabilidad histórica en el planeta así lo acredita. Sin embargo, la experiencia nos demuestra que una inadecuada gestión y aplicación de estos recursos naturales puede llevar también a su extinción. En contrapartida, los materiales artificiales no presentan esta ventaja inicial y deben por ello ser gestionados y aplicados con mucho mayor cuidado para alcanzar su mayor *ecoeficiencia* posible.

Así pues, la "responsabilidad ambiental" no recae solamente en la valoración pasiva del pecado original de cada material que llega a la obra sino que pivota principalmente en el uso responsable que de él hace el facultativo a través de los procesos técnicos de proyecto, construcción, explotación y desconstrucción final.

El uso ambientalmente responsable de un material constituye un proceso creativo y por tanto, de buena práctica susceptible de ser protocolizada y divulgada entre la comunidad de profesionales facultativos. Así pues, se puede afirmar, de entrada, que en la mayoría de los materiales y productos de la construcción, el impacto ambiental asociado es susceptible de ser ajustado al mínimo posible mediante buenas prácticas técnicas y de gestión aplicadas por prescriptores responsables. A continuación se acompañan algunos criterios divulgados por los expertos que aconsejan la prescripción de materiales:

1. **Lo más durables posible**, puesto que la suma del conjunto de sus impactos ambientales (dividendo) dividida por una elevada vida útil (divisor) determinará una intensidad menor de su impacto ambiental; los adversarios a batir para desarrollar este criterio son:

   - la falta de valoración precisa, en la literatura técnica, de los comportamientos de los materiales a largo plazo,
   - las dificultades de acomodar en un mismo edificio materiales con distinta vida útil.

2 **Lo más acreditados posible (disponibilidad de distintivo de calidad ambiental o "ecoetiquetas")**, puesto que esta labor de seguimiento con rigor del impacto ambiental de un material a lo largo de su vida útil como producto y su correspondiente certificación, no puede estar en manos de un prescriptor, el cual debe estar atento principalmente a satisfacer necesidades de habitabilidad; los adversarios a batir para desarrollar este criterio son:

   - los criterios diversos con que se establecen estas etiquetas,
   - su ámbito de aplicación,
   - el seguimiento.

3 **lo más bajos en valor de impacto ambiental cuantificado**, puesto que los actuales impactos ambientales de la industria de producción de materiales de construcción están, en general, fuertemente desbocados por falta de una suficiente tradición técnica en incorporar este criterio junto a otros ya consolidados como los de comodidad o reducción de costes

monetarios; el adversario a batir para desarrollar este criterio es la dificultad metodológica para sumar todos los impactos con una misma unidad. En esta transición las unidades de energía y de emisiones de CO_2 están asumiendo este rol.

4 **Lo más reciclados posible**, puesto que cada gramo de material ya usado que se consigue incorporar a un producto nuevo resta en su práctica totalidad el impacto ambiental asociado; los adversarios a batir para desarrollar este criterio son la falta de homogeneidad por lo que respecta al desarrollo de las técnicas de reciclado, y la falta de inserción comercial de muchos residuos ya valorizados. Alguien debería recordarnos que el mismo cuerpo que nos da la vida es el producto de millones de procesos de reciclado desarrollados durante millones de años.

5 **Lo más ahorradores en consumo energético asociado**, puesto que los procesos actuales de transformación de las fuentes de energías disponibles son muy poco eficientes (25% en la automoción, 33% en la electricidad convencional, 70% en los sistemas de calefacción, etc.) con lo que el ahorro de cada unidad actual de energía disponible supone siempre multiplicar por un factor >1 la reducción del impacto ambiental asociado; el adversario a batir es aflorar los costes energéticos primarios.

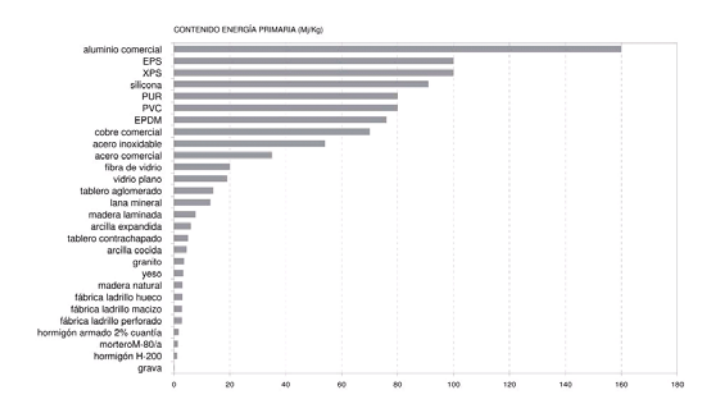


Fig. 24. Gráfico extraído del proyecto de investigación CDTI IDI-20090761. En las ordenadas se representan materiales habitualmente utilizados en fachadas de edificios. En las abscisas se representa la energía primaria invertida en el proceso de su fabricación por cada kg. resultante. A pesar nuestro en la gama alta de la gráfica se hallan la mayoría de los nuevos materiales del siglo XX.

6 **lo más reutilizables y/o reciclables cuando acaben su vida útil**, puesto que la cantidad de material actualmente depositado en los edificios ya construidos y en funcionamiento constituye una de las principales reservas de material de construcción fácilmente accesible; existen ciertamente otras importantes reservas cuantificadas de potenciales materiales de construcción en el planeta, pero mucho más difícilmente accesibles puesto que se hallan habitualmente en ubicaciones difícilmente accesibles con medios normales; el adversario a batir es el desapego fuertemente arraigado entre todos por lo ya usado que, una vez superado, se transforma en ocasiones, en admiración por lo antiguo.

7 **Lo más fácilmente desmontables**, puesto que durante muchos siglos construir, ha sido un problema técnico orientado unidireccionalmente hacia el monolitismo, justificable tal vez por la gran estabilidad temporal de las sociedades históricas; esta estabilidad temporal se está modificando y actualmente son ya muchos los arquitectos que han tenido la experiencia vital de hacer frente al derribo, total o parcial, de un edificio anteriormente proyectado y construido por ellos mismos. La ineficiencia de los actuales procesos de derribo frente a los evolucionados procesos de construcción hace evidente que, en previsión de situaciones inmediatas, se debe reconsiderar el diseño de los actuales sistemas de unión para que sean mucho más fácilmente reversibles; el adversario a batir es el monolitismo solidario fuertemente arraigado en todos los agentes del sector de la construcción.

8 **Lo más estandarizados posible**, puesto que el éxito en la exigencia de una eficiencia ambiental bascula en buena parte en la capacidad para encadenar procesos técnicos; la falta, por ejemplo, de buenas prácticas de coordinación dimensional en los proyectos y en las obras, dificulta extraordinariamente la eficiencia de los procesos de suministro, mantenimiento y reutilización de elementos constructivos; el adversario a batir es la admiración fuertemente arraigada en el sector por la singularidad aparente.

9 **Lo más próximos posible** (para disminuir así el consumo energético asociado al transporte ya que no otorga valor alguno al producto transportado), puesto que en las décadas recientes, con la liberalización del derecho comercial y la reducción de los costes monetarios del transporte, se ha extendido la práctica de acarrear los materiales de construcción a lo largo del planeta con el sólo objetivo de buscar ventajas monetarias; no se trata tan solo de priorizar el uso de los materiales de proximidad sino también de priorizar aquellos procesos internos aplicados a los materiales que sean menos intensos en kilómetros: se puede adquirir cemento de una factoría cercana pero que moltura clínker de procedencia lejana y que a su vez utiliza margas también alejadas; el adversario a batir es la falta de una trazabilidad suficientemente transparente de los productos de construcción que cada día llegan a las obras (*designed in, made in, assembled in*, etc.).

Estás prácticas citadas y otras más han sido a menudo demonizadas en los medios de comunicación bajo el pretexto de que encarecen el coste de los productos de construcción. Ello es así a corto plazo pero no a medio y largo plazo. Los motivos de esta afirmación, corroborada por la experiencia, residen en dos factores:

- un sector industrial tensado por una nueva exigencia no prevista, como es el caso actual de la reducción del impacto ambiental, se ve generalmente obligado a reconsiderar y repensar el conjunto de todas sus prácticas en vigor, con lo que inevitablemente depura la puerta a la depuración indirecta de la totalidad del proceso habitual de producción, y aumenta finalmente su eficiencia de conjunto,
- existe un gran diferencial de valor entre la suma agregada de los costes unitarios de construcción y el valor de conjunto por el que se venden los edificios. Este margen es destinado principalmente a gratificar el riego del capital promotor, con lo cual resta poco margen para ser aplicado al desarrollo de conocimiento orientado a la mejora del proceso de producción del edificio. Si además la promoción de edificios se concibe como una actividad discontinua en el espacio y el tiempo, todo ello redunda en una falta de competitividad técnica congénita del sector de la construcción.



Fig. 25. Fotografía del apilado de residuos tras un derribo en una obra de remodelación interior. Al arquitecto le debe preocupar tanto el nacimiento de los materiales y productos de la construcción como su muerte. Evitar estas imágenes requiere previsión e innovación en la valorización de los residuos de la construcción. Fuente propia.

La prescripción de un material según los criterios anteriormente citados no es una decisión finalista. La prescripción de un material debe estar basada en una consideración de toda la vida útil a la que va a estar sometido. La herramienta de análisis más utilizada en el estudio de la repercusión ambiental global de los materiales y soluciones constructivas aplicadas en un edificio es el Análisis de Ciclo de Vida (*LCA, Life Cicle Analysis* en inglés). Este método analiza y valora ambientalmente los diferentes procesos sucesivos a que son sometidos los materiales (producción, transporte, utilización, etc.) desde su extracción en la naturaleza hasta su depósito en el vertedero y establece indicadores que cuantifican los impactos asociados: efecto invernadero, ozono, energía, residuos, etc. Sólo desde una visión amplia de conjunto y con perspectiva temporal de futuro se pueden tomar decisiones responsables.

10. Proyecto de referencia

FB720 es un sistema innovador de fachada ligera, modular tipo “unitized”, que pretende aprovechar las principales ventajas de este tipo de sistemas - ligereza, facilidad de montaje y fiabilidad técnica- incrementando sus prestaciones ambientales y energéticas. El sistema se ha desarrollado a partir de los planteamientos convencionales de este tipo de fachadas, incorporando adicionalmente las siguientes innovaciones técnicas:

- Aprovechamiento del propio espesor de la fachada como protección solar mediante la colocación de la subestructura resistente (montantes) hacia el exterior.
- Integración de materiales alternativos con un menor impacto ambiental.
- Integración de un sistema de vidrios de protección solar variable especialmente desarrollado para este proyecto.



Fig. 26. Fotografías de distintos prototipos variantes del sistema de fachada FB720. Fuente: b720.

La combinación de estas estrategias es una oportunidad para hacer más visibles y notorias las acciones de mejora de la sostenibilidad promovidas desde los planteamientos arquitectónicos. El resultado final obtenido constituye una solución constructiva competitiva, tanto por su coste inicial, adecuado a proyectos de gama media y alta, como por la reducida repercusión de su superficie construida en comparación con otros sistemas de doble piel, así como por la utilización de medios pasivos de control climático. Para una reducción efectiva del impacto ambiental asociado a los materiales constituyentes del sistema de fachada se plantean tres estrategias básicas:

- Reducción dimensional mediante la optimización dimensional de los perfiles de aluminio.
- Utilización de un alto porcentaje de material de origen reciclado en la perfilería de aluminio y en el vidrio.
- Diseño de componentes mixtos que permitan la integración de materiales alternativos con un impacto ambiental reducido.



Fig. 27. Vista fotográfica de una muestra de uso de los diversos materiales alternativos ensayados. Fuente: b720.

El objetivo es el desarrollo de un sistema alternativo de fachada ligera que reduzca la dependencia excesiva del uso de materiales con un alto impacto ambiental (aluminio, acero, polímeros, etc.) a la vez que se favorece la utilización de materiales de proximidad y de origen renovable o reciclado-industrial. La subestructura propuesta se compone de un entramado de sección reducida de perfiles de aluminio con un alto contenido acreditado de material de origen reciclado que aportan las prestaciones básicas de ensamblaje, trabajo mecánico, estanqueidad e impermeabilidad. Su capacidad portante se complementa mediante unos refuerzos adicionales liberados de cualquier otra misión que no sea la meramente resistente, lo que permite la utilización de una amplia gama de materiales alternativos de mayor conveniencia medioambiental, entre los que se han ensayado la madera laminada, la "madera tecnológica" (compuesto de residuos de madera con residuos plásticos), el PVC reciclado y el UHPC (hormigón de altas prestaciones reforzado con fibras).

De forma similar, en los paneles de relleno de las módulos opacos es posible integrar también elementos alternativos con el objeto de reducir el impacto ambiental: aglomerados de fibras naturales (lana de oveja, algodón), mantas de residuos textiles reciclados, tableros conformados a partir de residuos de moquetas reutilizada o tableros laminados de yeso con fibras de papel reciclado. Esta variedad de materiales alternativos permite la adaptación del sistema constructivo FB720 al contexto económico, cultural e industrial de cada proyecto de edificio. No se trata, por tanto, de una solución técnica "cerrada" sino de un planteamiento abierto a las oportunidades que ofrece cada caso.

La fachada FB720 puede adoptar numerosas variantes que son producto de la combinación de diversos materiales, tipos de vidrio, proporción de parte transparente y distancias entre montantes. A partir de un prediseño realizado por el equipo de arquitectos, las preguntas que se formularon fueron:

- ¿Es posible realizar un análisis de ciclo de vida resumido (ACV) realizado sobre diferentes variantes de un mismo desarrollo de un nuevo muro cortina denominado FB720, cuyas alternativas se basan en distintas combinaciones de materiales (montantes exteriores, aislamiento térmico, cerramientos interiores, etc.), tipos de vidrio (incoloros, estacionales, bajo emisivos, etc.), proporciones de la parte transparente del cerramiento (75% y 37%) y separaciones entre ejes de montantes (60 cm y 120 cm), todo ello para un ciclo de vida de 50 años?
- ¿Qué configuración de fachada, entre las posibles configuraciones de FB720, hace posible la máxima reducción de impacto ambiental?
- ¿Cuál es la situación del nuevo muro FB720, por lo que al ACV se refiere, en comparación con un muro cortina modular estándar (MCM), por una parte, y una fachada pesada convencional estándar (FPC), por la otra?

Para responderlas adecuadamente se formó un equipo asesor de ACV formado por el LiTA ("Laboratori d'innovació i Tecnología a l'Arquitectura") de la UPC y la firma consultora "Societat Orgànica" constituida por Doctores formados en la UPC. La evaluación ambiental que aquí se presenta se refiere solamente a los impactos ambientales derivados del ciclo de los materiales durante la vida útil de la fachada. La dimensión de análisis ambiental que hace referencia a su comportamiento térmico y lumínico como piel del edificio fue realizada por otro equipo técnico y no se muestra en esta publicación.

La metodología empleada en este caso fue la del ACV de procedimiento resumido, considerando que el objetivo era prestar soporte al equipo de arquitectos proyectistas en su toma de decisiones. Se adoptaron las siguientes consideraciones previas:

- Unidad funcional: 1 m^2 de fachada, con una vida útil de 50 años.
- Fases consideradas: producción de materiales (1), transporte (2), Construcción (3), mantenimiento (4), derribo y gestión final de residuos (5).
- Impactos evaluados: peso de los materiales [kg/m^2], consumo de energía [MJ/m^2], y emisiones de CO_2 [$kg{\cdot}CO_2/m^2$]. En algunas fases también se incluyeron los parámetros residuos sólidos [kg/m^2], material reciclado o renovable en el inicio del ciclo de vida [kg/kg], material reciclable o compostable en el final del ciclo de vida [kg/kg] y toxicidad ambiental [ECA kg/kg].
- Asunciones y límites del procedimiento resumido: en (1) todas las operaciones de extracción y transporte de materias primas hasta la fábrica de materiales. El

transporte desde éstas hasta la fábrica de muro cortina, así como las operaciones propias de fabricación y montaje de sus componentes. No se incluye la consideración de la intensidad material por unidad de uso (MIPS). En (2) la utilización de los combustibles empleados por los medios de transporte. No se tendrá en cuenta el ciclo de vida de vehículos ni infraestructuras. En (3) el uso de maquinaria que consuma energía (eléctrica, gasóleo, etc.). No se tendrá en cuenta el gasto energético de la fuerza humana ni tampoco la amortización de medios auxiliares. En (4) operaciones de mantenimiento, sustitución parcial y total en el plazo de 50 años. En (5) el desmontaje del cerramiento hasta alcanzar el nivel de separación de los materiales que componen la solución constructiva y la gestión en los residuos no reciclables.

- Herramientas y bases empleadas: casi todos los cómputos se han realizado con la ayuda de hojas de cálculo estándar y sin la utilización de programas expertos. Las bases de datos sobre materiales consultadas han sido BEDEC PR/PCT del ITeC, ICE de la Universidad de Bath, EMPA del Consorcio de Universidades Públicas de Suiza, ELCD de la Unión Europea y en algunos casos ECOINVENT e IVAM mediante cálculos realizados con el programa SIMAPRO (obtenidos a partir de un proyecto de investigación del Centro de Iniciativas de la Edificación Sostenible) así como cálculos propios para la determinación del volumen y la densidad de los materiales que conforman las diferentes soluciones constructivas y de su peso específico. En cuanto a las operaciones de transporte y carga, así como la generación de residuos, se ha consultado el mismo banco PR/PCT, así como información proporcionada por fabricantes, otros estudios, cálculos y estimaciones propias.

En la conversión del consumo de energía (en kWh eléctricos o litros de gasoil) a emisiones de CO_2 fueron tenidos en cuenta los coeficientes de paso establecidos en los procesos de la certificación energética española; en el caso del material reciclado o renovable y reciclable o compostable, cálculos propios así como información proporcionada por fabricantes o terceras partes

Como parte del proceso de desarrollo de proyecto de la fachada FB720 se estudiaron diversas opciones de reducción de impacto ambiental, aplicables en cada etapa del ciclo de vida. Algunas de ellas finalmente no fueron incorporadas debido a que presentaban dificultades técnicas (por ejemplo, sustitución de materiales que hubieran necesitado del desarrollo de nuevas matrices de fabricación de otros ya empleados), económicas (por ejemplo, rediseño de producto y proceso de fabricación de un componente constructivo estándar que hubiera supuesto un gran gasto) o de orden práctico (por ejemplo, localización de las plantas de fabricación de materiales o productos y del propio taller de fabricación del muro cortina). A continuación, siguiendo el orden de las diversas fases del análisis del ciclo de vida, se presentan cinco alternativas de reducción de parámetros de impacto ambiental (energía, emisiones de CO_2, materiales, residuos, etc.) aunque valoradas en forma simplificada mediante el indicador de consumo de energía. Finalmente se valora la repercusión que supondría la incorporación de todas ellas en el sistema FB720.

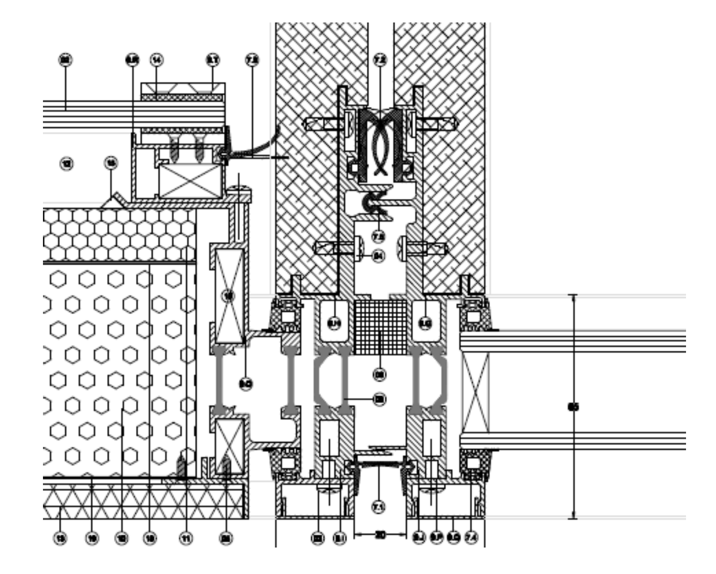


Fig. 28. Detalle técnico tipo de una de las diversas variantes de la fachada FB720. Fuente: b720.

1. **Fase de extracción-fabricación de materiales**: propuesta de cambio de algunos de los perfiles de aluminio 100% reciclado por listones de madera laminada, con el objetivo de reducir aún más su impacto ambiental. Se redefinió el detalle técnico (Fig. 28) y tomando como hipótesis la configuración de cerramiento A/II/37/120 se planteó la substitución de hasta 2,2 kg/m^2 de aluminio por 3,07 kg/m^2 de madera laminada. Este cambio supone, respecto de la configuración original, una reducción de energía de producción de los materiales de unos 65 MJ/m^2, lo que representa un 4,5% de los 1447,5 MJ/m^2 del consumo energético del conjunto de todos los materiales de la configuración original de esta fachada. Puede parecer un ahorro poco significativo pero comparativamente representa más de 6 veces la energía de construcción o desmontaje de la fachada (entre 11 y 12 MJ/m^2).
2. **Fase de transporte**: propuesta de situar el taller de fabricación de fachadas lo más próximo posible a las áreas de grandes ciudades que presenten una demanda potencial de instalación de muro cortina, tanto en obra nueva como en sustitución. Con esta medida se persigue alcanzar una reducción del consumo de combustibles utilizados por los camiones que se desplazan entre la fábrica y las obras, disminuyendo tanto la energía consumida como las emisiones de CO_2 asociadas. Se ha considerado una disminución de la distancia considerada en el estudio (750 km desde Olot, donde se encuentra el taller de fabricación de fachadas, hasta Madrid, que es una de las localizaciones de las hipotéticas obras a atender) del orden de 10 a 1, es

decir, reducir el trayecto anterior hasta sólo 75 km (para ello el taller de fabricación se ha situado hipotéticamente en Toledo, manteniendo la obra en Madrid). La situación inicial suponía un consumo de gasoil de 2,44 litros/m^2, que representan 102,71 MJ/m^2. La disminución de 751 a 75 km en el trayecto taller-obra supone un consumo de gasoil de 0,74 litros/m^2, que representa 31,31 MJ/m^2. La reducción conseguida es de 71,40 MJ, que es el 69,5% del total de la energía de la fase de transporte.



Fig. 29. Fotografía de conjunto de las variantes consideradas durante el desarrollo del prototipo. Fuente: b720.

3. **Fase de construcción:** propuesta de materiales de embalaje reutilizables y 100% reciclables. En la puesta en obra del sistema FB720, casi no se generan residuos de construcción porque las operaciones en obra se limitan a anclar el cerramiento a la estructura del edificio. Los residuos principales son, por tanto, los materiales empleados en el embalaje de los paneles de fachada. Estos materiales suponen un doble impacto: el de su producción (extracción-fabricación) y el de su gestión final como residuos (separación, carga, transporte y tratamiento final). En términos de consumo de energía, la producción de los materiales de embalaje utilizados (principalmente polietileno, espuma sintética, madera y acero) representan 3,78 MJ/m^2. La gestión de los residuos generados por estos embalajes desechables tiene un impacto energético de 0,51 MJ/m^2. El ahorro de energía que supondría utilizar un sistema de embalaje reutilizable y reciclable se estima en un 80% de dicho consumo, teniendo en cuenta un mínimo de cinco usos y un reciclaje completo (con lo que se evita la gestión final pero no el consumo de energía de los procesos de la carga y transporte). El consumo de energía en esta fase, bajo la hipótesis anterior, se podría ajustar hasta 0,78 MJ/m^2.
4. **Fase de mantenimiento:** propuesta de aumentar la vida útil de toda la fachada de 35 a 50 años. En la hipótesis inicial de este estudio se había previsto, a partir de los conocimientos existentes en el mercado sobre la durabilidad de los muros cortina existentes, el reemplazo casi total de la fachada a los 35 años. Este es el caso de los muros cortina construidos en los años '70 del S. XX, cuyos fallos principales son la pérdida de estanqueidad por deterioro de las juntas y unas escasas prestaciones de aislamiento térmico y protección solar. Sin embargo, se desconoce aún la durabilidad de los muros cortina de reciente fabricación, que podría ser superior si los materiales elásticos de las juntas demostraran una vida útil superior. La sustitución total de la fachada FB720 (actividades de remoción, carga y transporte, así como idénticas operaciones en la nueva fachada), supone un consumo energético de 442,91 MJ/m^2 (suponiendo que una cierta cantidad de los materiales se recuperaran y que sólo se repercute la parte proporcional a los 15 años de vida útil, desde el año 35 hasta el año 50 en este estudio), Si en cambio, se consiguiera ampliar la vida útil de la fachada hasta un periodo de 50 años (durabilidad potencialmente alcanzable en todos los materiales a excepción de las juntas y los cordones de sellado) y se prevé un resellado a los 15 años, ya considerado en el cálculo, y otro adicional a los 30 años, su repercusión energética es de apenas 0,027 MJ/m^2 (contando la aportación de material de sellado y los medios auxiliares de obra para su aplicación en altura). El ahorro energético por tanto puede alcanzar prácticamente el 100% del impacto de la fase.
5. **Desconstrucción**: propuesta para que los paneles de acristalamiento con cámara de aire sean completamente desmontables y totalmente reciclables. Actualmente la gestión como residuo del acristalamiento con cámara, del vidrio laminado y de los vidrios con impresiones, tintas, deposiciones, serigrafías, etc., es compleja. La composición y el tipo de juntas entre los distintos vidrios que forman los paneles no son reversibles lo cual impide recuperar los materiales originales en un estado tal que permita un reciclaje técnica y económicamente sencillo. Como resultado de ello, gran parte del vidrio utilizado en construcción no se recicla sino que se *infracicla* (se tritura y se mezcla como carga

en compuestos de calidad inferior). Lo que se persigue con esta medida propuesta es evitar un doble impacto ambiental: el ocasionado por el *infraciclado* (que se evitaría con el desmontaje y separación selectiva de los vidrios componentes) y el ocasionado por la producción de nuevos materiales (que se evitaría si se pudieran reutilizar o reciclar los acristalamientos ya existentes). El impacto ambiental energético de la fase de *desconstrucción*, aun teniendo en cuenta que la mayoría de los materiales se recuperarían para ser reutilizados o reciclados, es de 10,99 MJ/m^2. Dejando a un lado el impacto de las operaciones de desmontaje, carga y transporte a un centro de reciclaje donde se desarmarían los paneles, el impacto que se podría evitar con esta medida es de 0,15 MJ/m^2, correspondiente a la gestión de los residuos en vertedero (juntas y paneles de vidrio cámara) y de 0,25 MJ/m^2, correspondiente al transporte desde donde se desmonta el módulo de fachada hasta el vertedero. Además, se ahorrarían hasta 204,5 MJ/m^2 gracias a la reutilización de los vidrios (se supone un 50% del total), porque de esta forma se evitaría la producción de material nuevo.

Fig. 30. Fotografía del prototipo durante la fase de ensayos en laboratorio. Fuente: b720.

La cuantificación de la repercusión de las propuestas de mejora en el ciclo de vida se muestra en la siguiente figura 31: se presenta un cuadro del conjunto de la repercusión favorable de las diferentes mejoras propuestas, en términos absolutos y relativos (considerando un consumo energético total de la fachada FB720 de 2.278,08 MJ/m^2 a lo largo de todo su ciclo de vida).

Medida de mejora	Ahorro (MJ/m^2)	% ahorro s/total
1. Sustitución de perfiles de aluminio por madera	65,00	2,85%
2. Taller de fachada próximo a la obra (75 Km)	71,40	3,13%
3. Embalaje reutilizable y materiales reciclables	3,43	0,15%
4. Vida útil de las juntas extendidas a 50 años	442,91	19,44%
5. Paneles de vidrio totalmente desmontables	204,90	8,99%
Totales	**787,64**	**34,57%**

Fig. 31. Cuadro del conjunto de la repercusión favorable de las diferentes mejoras propuestas, en términos absolutos y relativos.

Aunque las diversas medidas de mejora propuestas suponen grados de dificultad de puesta en práctica muy diferentes (no es lo mismo relocalizar un taller de fabricación de fachadas que desarrollar un nuevo embalaje), se constata que existen suficientes oportunidades de mejora con repercusión y que, combinadas entre sí, pueden aportar un ahorro de hasta un tercio del total de la energía inicial.

11. Conclusiones

Una mayor consciencia por parte del arquitecto de las repercusiones medioambientales que pueden ocasionar un uso irresponsable de los recursos materiales al servicio de la arquitectura no sólo refuerza el carácter social de su actividad sino que puede estimular su creatividad y espolear una arquitectura más innovadora que aporta valores dinámicos en sintonía con la vida que alberga.

Una reflexión muy precisa y focalizada sólo en los materiales de construcción podría llevarnos a simplificar una realidad que siempre resulta más compleja que cualquier aproximación disciplinar experta. Efectivamente, el uso de materiales, productos y sistemas constructivos con un alto grado de *ecoeficiencia* es una condición necesaria pero no suficiente para conseguir un grado notable de sostenibilidad ambiental a escala de edificio.

Un uso cuantitativamente excesivo de material, unas uniones mal diseñadas, un transporte ineficiente o una mala gestión del uso final del edificio pueden ser malas prácticas que contrarresten en el balance global las buenas prácticas ambientales iniciales que conlleva la prescripción de productos de construcción altamente *ecoeficientes*. En este sentido, la industrialización, con su riguroso método de trabajo disciplinar, puede colaborar en la metodología de cuantificación y limitación de los impactos ambientales en todas las escalas.

Glosario

ACV, Análisis de ciclo de vida: el análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta que se usa para evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida

mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando. El Análisis del Ciclo de Vida de un producto típico tiene en cuenta el suministro de las materias primas necesarias para fabricarlo, transporte de materias primas, la fabricación de intermedios y, por último, el propio producto, incluyendo el envase, la utilización del producto y los residuos generados por su uso.

Análisis de Flujos de Materiales (Flow Material Anayisis): el análisis de flujos de materiales permite conocer de forma cuantitativa y cualitativa la interacción de los diversos *imputs* y *outputs* de materiales que intervienen en el proceso de producción concreto que se desea estudiar, el cual debe de estar deslindado en el tiempo y en el espacio.

Byte: es una secuencia de bits contiguos, cuyo tamaño depende del código de información o código de caracteres en que sea definido. Se usa comúnmente como unidad básica de almacenamiento de datos en combinación con los prefijos de cantidad. Originalmente el byte fue elegido para ser un submúltiplo del tamaño de palabra de un ordenador, desde cinco a doce bits. La explosión de las microcomputadoras basadas en microprocesadores de 8 bits en los años 1980 ha hecho obsoleta la utilización de otra cantidad que no sean 8 bits.

Commodities: originalmente en economía el término se refiere a cualquier mercancía, considerada como producto para uso comercial pero generalmente se hace énfasis en productos genéricos, básicos y sin mayor diferenciación entre sus variedades (madera, cemento, azúcar, etc.).

Constructibilidad: es la aptitud de una técnica para resolver el conjunto de requerimientos que se exigen a un sistema constructivo. Para ser considerado útil, oportuno e idóneo para ser utilizado en la realización de obras de construcción.

Declaraciones Ambientales de Producto, DAP: las Declaraciones Ambientales de Producto (*Environmental Product Declaration, EPD*) se fundamentan en unas directrices ISO y tienen como finalidad aportar información cuantitativa de los impactos ambientales que comporta un producto a lo largo de su ciclo de vida. En sí mismas, no definen criterios de preferencia ambiental ni establecen requisitos mínimos a cumplir, simplemente informan. En este sentido, se trata de analizar el ciclo de vida de un material o sistema en profundidad y ofrecer esta información para la toma de decisiones de proyecto y ejecución de obras.

Desvalorización: en nuestra sociedad técnica de consumo los productos sufren una progresiva valorización a medida que se acercan al consumidor pero una vez finalizada su vida útil son desechados perdiendo totalmente de forma súbita su valor e incluso, en algún caso, reclamando el sufragio de una tasa económica para su tratamiento posterior como residuo.

Ecoetiquetas: son distintivos otorgados por la administración o por otra organización que garantizan el cumplimiento de unos criterios ambientales por parte del producto. De esta forma, el consumidor puede reconocer en un producto etiquetado, que éste cumple unas rigurosas especificaciones ambientales exigidas por el organismo otorgador. Para cada categoría de productos hay unos criterios ecológicos que permiten la evaluación y concesión de la ecoetiqueta, que es válida durante un periodo máximo de años. El producto está siempre bajo control del organismo que otorga la ecoetiqueta.

Habitabilidad: es la aptitud de un hábitat físico para resolver el conjunto de requerimientos que se le exigen para sustentar las necesidades de entorno de las personas que en él habitan.

Homo Faber: es una locución latina que significa "el hombre que hace o fabrica". Se usa principalmente en contraposición a Homo Sapiens, la denominación biológica de la especie humana, locución también latina que significa "el hombre que sabe".

Infraciclado: se refiere a aquellos procesos de reutilización de materiales en los que el resultado es claramente inferior en calidad al material original por lo que debe utilizarse en aplicaciones menos exigentes y no se cierra realmente el ciclo de vida del material.

LEAN construction: es una combinación entre la disciplina de la gestión de proyectos de construcción y la aplicación de los principios y prácticas del Lean Manufacturing. Su objetivo persigue la mejora continua de los procesos de construcción para la minimización de los costes y maximización del valor del producto final definido por el cliente.

Material: en ingeniería, un material es una sustancia (elemento o, más comúnmente, compuesto químico) con alguna propiedad útil, sea mecánica, eléctrica, óptica, térmica o magnética.

MIPS, "material input per unit of service": es un concepto económico, originalmente desarrollado por el Instituto Wuppertal (Alemania) en la década de 1990. El concepto de MIPS se puede utilizar para medir la eficiencia ecológica de un producto o servicio. Su cálculo tiene en cuenta la cantidad de los materiales necesarios para producir un producto o servicio. La entrada total de material (MI) se divide por (P) el número de unidades de servicio (S).

Producto: en ingeniería, un producto es cualquier cosa material que se puede ofrecer a un mercado para satisfacer una necesidad técnica.

Proyecto Sirena: SIRENA es el acrónimo de Sistema de Información de Recursos Energéticos y Agua, y como indica su nombre, sirve para organizar la información de consumos de electricidad, gas y agua de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). SIRENA obtiene datos de diferentes seguidores de consumo que se han ido instalando en los edificios de la UPC en los últimos años. Estos datos provienen directamente del Power Studio, que es un SCADA que recoge estos datos con una periodicidad de 15 minutos. También hay datos que se introducen manualmente, provenientes de datos de facturación, estimaciones, etc. El objetivo es poder ofrecer, como mínimo, el mismo nivel de información mensual para todos los edificios y campus de la Universidad.

Sistema constructivo: es un conjunto de elementos (productos, técnicas, herramientas, procedimientos y equipos) orientado a la resolución de un conjunto de requerimientos en una edificación.
Sostenibilidad: desde la perspectiva de la prosperidad humana y según el "Informe Brundtland" de 1987, la sostenibilidad consiste en la aptitud de una práctica humana de satisfacer las necesidades de la actual generación sin menoscabar la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.
TRE Tasa de retorno energético: se conoce como tasa de retorno energético al cociente de la cantidad de energía total que es capaz de producir una fuente de energía y la cantidad de energía que es necesario emplear o aportar para explotar ese recurso energético.



Fig. 32. La generalización de los semiproductos en primer lugar, y de los composites con ellos desarrollados en segundo lugar, ha dado lugar a una nueva generación de residuos que requieren atención especial en el tratamiento de los residuos a pie de obra. Fuente propia.

Bibliografía

[1] *http://www.upc.edu/sirena/*
[2] *http://es.wikipedia.org/wiki/Informe_Brundtland*
[3] Tesis doctoral de Lidia Rincón Villareal, *"Material Flow Analysis of the Building Sector in Lleida*" leída en el año 2011 en la Universitat de Lleida, y dirigida por los profesores A. Cuchí y L. Cabeza.
[4] *http://www.leanconstruction.org*
[5] *La mecanización toma el mando*, Siegfried Giedion, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1978.
[6] *Industria y Arquitectura*, Salvador Pérez Arroyo et alter, Editorial Pronaos, Madrid, 1991.
[7] Trabajo Fin de Máster (TFM) realizado por el alumno Roger Moreno Megías en el marco del Máster de Tecnología de la Arquitectura de la Universitat Politècnica de Catalunya (convocatoria febrero 2012) titulado "*Estudi de l'evolució tecnològica de la vivenda social a Barcelona en la segona meitat del s.XX: Les promocions del Patronat Municipal de l'Habitatge*", *http://mastersuniversitaris.upc.edu/tecnologiaarquitectura/Moreno.pdf*
[8] Ponencia presentada en las II Jornadas de Investigación en Construcción realizadas en el año 2008 en el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción titulada *"El rol de la publicidad de los medios de comunicación escritos, en la difusión de las innovaciones tecnológicas: las revistas profesionales de arquitectura*" por Manuel Hilario Radillo-Lera consultable en *http://hdl.handle.net/2117/2546*
[9] Tesis doctoral de Gerardo Wadel leída en 2009 en el marco del Programa de Doctorado "Àmbits de recerca en Arquitectura, Energia i Medi Ambient" de la Universitat Politècnica de Catalunya y dirigida por el profesor Jaume Avellaneda con el título " *La sostenibilidad en la construcción industrializada: la construcción modular ligera aplicada a la vivienda*" donde se aborda con la metodología LCA (análisis de ciclo de vida) el potencial de reciclaje que ofrece la construcción industrializada ligera y modular.
[10] Tesis doctoral de Luiz Enrique Maccarini Vefago leida en 2012 en el marco del Programa de Doctorado "Ambits de recerca en Arquitectura, Energia i Medi Ambient" de la Universitat Politècnica de Catalunya y dirigida por el profesor Jaume Avellaneda con el título: *"El concepto de reciclabilidad aplicado a los materiales de construcción y a los edificios: propuesta de índices para evaluar la reciclabilidad de los sistemas constructivos."*
[11] Pol Alonso Pujol, Ponencia presentada en el marco del Congreso SBD Madrid 2010.*"Observatorio Oeil: observatorio de la evolución de los interiores arquitectónicos"*
[12] Gestores de Runes de la Construcció S.A. *http://www.grc.cat/*
[13] Borsa de Subproductes de Catalunya BSC), *http://www.subproductes.com*
[14] Adriana Ascaso Moreno. Trabajo de investigación realizado en 2010 en el marco de una Beca Colaboración con el Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la UPC: *"Comptador quilomètric de la construcció: un nou indicador de la sostenibilitat"*. *http://hdl.handle.net/2099.1/13343 y http://hdl.handle.net/2099.1/13349*
[15] *Propiedades de los materiales y elementos de Construcción,* Ramon Sastre, Edicions UPC, Barcelona 2010
[16] *Registro de Materiales, Institut de Tecnología de la Construcció de Catalunya* *http://www.registredemateriales.com/nouregistre.c/*
[17] Feria Ecobuild, *http://www.ecobuild.co.uk/*
[18] *"Materials de Construcció"*, Collecció la Indústria a Catalunya, 4, Roser Esteve i Oró, Generalitat de Catalunya, Departament d'Indústria i Energia, 1991.
[19] Tesis doctoral de Teresa del Rosario Arguello Mendez, *"Los materiales de construcción para la edificación progresiva y mejoramiento de la vivienda popular en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Análisis ambiental y alternativas"*, dirigida por el profesor A. Cuchí en el Programa de Doctorado "Ambits de Recerca en Arquitectura, Energia i medi Ambient" de la Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
[20] *"La matería de la arquitectura"*, Joan Sabaté, artículo publicado en la revista Eupalinos, nº 8.
[21] *Mater in Progress, Nuevos materiales, Nueva industria,* Catálogo de la exposición, FAD, Ministerio de la Vivienda, 2009.
[22] *Smart Materials in architecture, Interior architecture and Design,* Axel Ritter, Editorial Birkhauser, 2007.

Bibliografía de consulta

Anderson, J., Steele, K., Shiers, D., *The Green Guide to Specification.* 4th Edition. IHS BRE Press and Wiley Blackwell, 2009.

Aranda, A. & Zabalza, I., *Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*, Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.

CIB *Agenda XXI on sustainable construction*, report publication 237.

CIB *Life Cycle design of Buildings, Systems and Materials*, report publication 323.

COAC, CAATB, UPC, ITEC, Institut Cerdà, *Final report of the Centre d'Iniciatives de l'Edificació Sostenible about research works on environmental impacts of building materials to develop an ecolabel system for building products* (electronic document), with financial support of the Generalitat de Catalunya, Barcelona, 2001.

Calatayud, D., Claret. C., Solanas, T., *34 Kg de* CO_2, Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, abril 2009.

Glover, J., *Wich is better? Concrete or Wood: A comparison...* (doctoral thesis), Department of Chemical Engineering, University of Sydney, 2001.

Graedel, E. & Allenby, B.,*Industrial Ecology*, AT&T Prentice Hall, New Jersey, 1995.

Hegger, M., Auch-Schwelk, V., Fuchs, M., Rosenkranz, T., *Construction materials manual*, Birkhäuser, edition Detail, Munich, 2006.

Kohler, N., König, H., Kreissig, J., Lützkendorf, T., *A life cycle approach to buildings*, Birkhäuser, edition Detail, Munich, 2010.

Kotaji, S., Schuurmans, A., Edwards, S., *Life-Cycle Assessment in Building and Construction: A State-of-the-Art Report*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 2003.

Rieradevall, J. & Vinyets, J., *Ecodiseño y ecoproductos*, Rubes Editorial, Barcelona, 1999.

Wooley, T. & Kimmins, S., *Green Building Handbook* (vol. 1 and 2), Spoon Press, London, 2000.

Wuppertal Institute for Climate Environment and Energy *Material intensity of materials, fuels, transport services* Version 2; 28.10.2003 (electronic document).

Zabalza, I., *Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España* (doctoral thesis), Universidad de Zaragoza, 2010.

Bases de datos de consulta

ELCD database, European Commission, Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability. *http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm*

BEDEC database, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. (ITeC), Spain. *http://www.itec.cat/*

EMPA database, ETH Board, Federal Council, Switzerland. *http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/54731/---/l=2h*

ICE database, University of Bath, United Kingdom. *http://www.bath.ac.uk/mech-eng/research/sert/*

ICARO, ecoproductos, Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia. *http://www.ctav.es/icaro*

Greenguard ecoproductos. *http://www.greenguard.com*

DAPc. *http://www.csostenible.net/index.php/es/productes*.

Industrialización y sostenibilidad en la tecnología de la arquitectura

Industrialization and Sustainability in the Technology of Architecture

José Mª González Barroso [a]

[a] *Dr. Arquitecto. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I. Subdirector de la E.T.S. de Arquitectura. de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña*

Resumen

En este texto se tratan las relaciones de compatibilidad entre la construcción industrializada y la demanda de sostenibilidad de la construcción. En ambos ámbitos se dan los vectores que con más fuerza están impulsando hoy la innovación. Las relaciones entre ellos se establecen a partir del objetivo de cerrar el ciclo de los materiales que intervienen en la construcción, con el fin de reducir el impacto ambiental de los recursos consumidos y de los residuos producidos mediante el reciclado de materiales y la reutilización de componentes. Este cambio de paradigma técnico y de gestión de los procesos de fabricación de materiales y componentes, no es posible si no se incorporan nuevas ideas a los procesos técnicos. Es el caso de la *desconstrucción*, como forma de desarmar un edificio que mejora las posibilidades de valorización de los residuos y su vuelta al ciclo de los materiales. La reducción del impacto ambiental por la vía de la *desconstrucción* no es un concepto finalista en sí mismo. Abre la oportunidad de incorporar los principios de la desconstrucción en el diseño de nuevos edificios más sostenibles. Así hablaremos de la construcción de la *desconstrucción* como alternativa a la idea general de considerar el edificio solamente para su construcción y vida útil. Su origen es el *"Design for disassembly"*, que también se utiliza en la concepción y fabricación de productos manufacturados para reducir el impacto ambiental. Los objetivos de cierre del ciclo de los materiales de construcción, los métodos de Dfd y la construcción de la *desconstrucción* nos orientan hacia un paradigma de construcción más sostenible, en el que las técnicas de construcción convencionales son remplazadas por los sistemas de construcción industrializada.

Palabras clave: Diseño para Desconstrucción, Construcción Industrializada, Ecología Industrial, Ciclo de Vida de los Materiales

Abstract

This document discusses the relations of compatibility between industrialized construction and new demands of sustainable construction. Both areas are the main vectors that strongly lead innovation nowadays. In order to reduce the environmental impact of the resources consumed and the waste produced, the relations between the two areas are set from the objective of closing the cycle of the materials involved in construction. This can be achieved by recycling materials and reusing components. The change of technical and management paradigm, in the fabrication processes of materials and components, is only possible if new ideas are incorporated to the technical process. This is the case of *deconstruction* as a way to dismantling a building, which improves the chances of waste recovery and its return to the cycle of materials. Reducing the environmental impact by the way of deconstruction is not a finalist concept itself. It opens the opportunity to incorporate the principles of *deconstruction* in the design of new and more sustainable buildings. Thus, we would talk about construction processes for *deconstruction*, as a new alternative opposite to the general idea of considering the building only for construction and service life. Known as 'Design for disassembly' is widely used in the design and production of manufactured products in order to reduce environmental impact. The targets of closing the cycle of building materials, the methods of Dfd, and the construction for *deconstruction*, lead us towards a paradigm of sustainable construction, in which conventional construction techniques are replaced by industrialized building systems.

Keywords: Design for Deconstruction, Industrialized Construction, Industrial Ecology, Life Cycle of Materials

1. Introducción

Los arquitectos e ingenieros que intervenimos en la edificación sabemos que el impacto ambiental de construir es uno de los más altos de las actividades industriales, sobre todo por la cantidad de materiales utilizados y los residuos que generamos. El metro cuadrado de un edificio de viviendas por ejemplo, genera 120Kg de residuos de construcción y su peso propio es de cerca de 1.2 Tm por m^2, que es la cantidad de residuos que se originan en su

* jose.m.gonzalez@upc.edu

Citar como: González Barroso, J.M. (2012). Industrialización y sostenibilidad en la tecnología de la arquitectura. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 250 - 265). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

demolición, principalmente de naturaleza pétrea.

El problema medioambiental al que nos enfrentamos es reducir ambos impactos ambientales, el de los recursos consumidos y el de los residuos producidos principalmente en la demolición. El problema no se resuelve considerando de forma aislada cada una de las partes. La solución de ambos problemas debe abordarse conjuntamente porque las estrategias son complementarias, de modo que mediante esta aproximación holística al problema reduciremos el impacto de un ciclo de vida lineal, perverso.

La reducción de los residuos que se generan mediante la reutilización, reciclado y otras acciones "R" semejantes permitirá tener un filón de recursos que pueden reincorporarse al ciclo de la producción de materiales de construcción o sus componentes, por lo que también reduciremos el consumo de nuevos materiales. Este proceso es propiamente el cierre del ciclo de los materiales. Así, la solución al problema del consumo de materiales por encima de las tasas de renovación -característica del ciclo orgánico- o de reposición -característica del ciclo tecnológico- está en la recuperación y valorización económica de los residuos como materiales y componentes. Naturalmente este discurso también alcanza a los trabajos y obras de rehabilitación de edificios.

En este nuevo entorno técnico, la gestión de los residuos es tan importante como la gestión de las materias primas para la fabricación de materiales y componentes. Sin embargo, las técnicas habituales de demolición no son compatibles con los nuevos objetivos. Además, comprobamos que los edificios que no han sido pensados para satisfacer las exigencias técnicas derivadas de estas estrategias, solamente alcanzan los objetivos de una forma muy limitada. Precisamente, la construcción debe ser pensada también para facilitar sus *desconstrucción.*

Proyectar para *desconstruir* es una de las diversas estrategias útiles para ayudar a reducir la carga ambiental de nuestro entorno construido; sin embargo, la *desconstrucción* por ahora no ha sido suficientemente estudiada e implementada de manera común. Con una mayor comprensión de los problemas del proceso y su interrelación, el proyectar para *desconstruir* es una consideración preliminar importante en cualquier proyecto de construcción. En definitiva, es una forma ambientalmente responsable de construir y hacer arquitectura.

Para conseguir cerrar el ciclo de los materiales debemos realizar un estudio del edificio y de sus componentes de manera que sean fácilmente *desconstruibles* o desmontables. De este modo alcanzaremos un alto nivel de recuperación y aprovechamiento de los materiales y serán reincorporados nuevamente a las construcciones.

En el ámbito de la ecología industrial estas ideas hace tiempo que se vienen aplicando en la metodología de diseño y fabricación de productos. Se denomina "*Design for disassembly*". En el ámbito de conocimiento de la construcción hace pocos años que se trata el tema -principalmente en Europa y el mundo de habla inglesa- donde están avanzando en la definición metodológica y las primeras aplicaciones. De hecho no se trata de una filosofía nueva desde la base, porque tiene mucho de síntesis de prácticas conocidas, aquellas que son más racionales y eficientes para alcanzar el objetivo propuesto.

La aportación más original de la propuesta que se expone en este texto es la de relacionar las demandas ambientales de sostenibilidad de la construcción con la forma de construir industrializada. La construcción basada en la tecnología contemporánea frente a la convencional, mal llamada tradicional, es una manera más efectiva de reducir el impacto ambiental de la construcción. Esta propuesta tecnológica apuesta por la innovación basada en la síntesis de industrialización y sostenibilidad ambiental.

El texto se estructura en dos partes. La primera es la exposición teórica de la materia; y la segunda es la aplicación de los conceptos y principios ejemplificados en unos casos de estudio que corresponden a materiales, componentes y edificios ejemplares.

En la primera parte se expone la necesidad de cerrar el ciclo de los materiales y las problemática de conseguirlo. A continuación, se enuncia y justifica la *desconstrucción* como alternativa técnica a la mejora de las demandas ambientales mediante la propuesta de la construcción de la *desconstrucción.* Esta propuesta en su conjunto debe situarse en el contexto del conocimiento previo adquirido en la industria manufacturera mediante la metodología de diseño del *Design for disassembly.* En el último apartado relacionamos los ámbitos de compatibilidad entre industrialización y sostenibilidad. Es la síntesis de todo el discurso propositivo del texto sobre una manera nueva de proyectar y construir los edificios.

2. El ciclo de los materiales y de los residuos

2.1. El ciclo de los materiales

Es conocido que el sector de la construcción es un gran consumidor de recursos y generador de residuos. Así, los recursos utilizados en la construcción de edificios y obras civiles son aproximadamente la mitad de los recursos consumidos en el mundo. Y los residuos de la construcción, excavación y demolición representan aproximadamente la mitad de todos los residuos que se depositan en los vertederos.

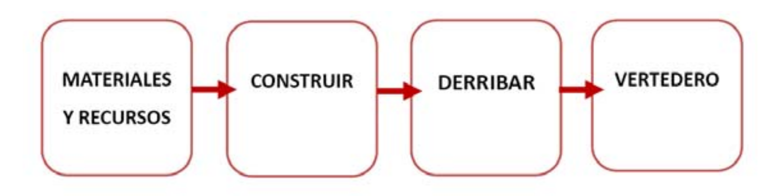
El impacto ambiental de la construcción, si queremos decirlo así, de la fabricación del edificio, es consecuencia del ciclo de vida de los materiales de construcción. El ciclo viene determinado por las siguientes etapas del proceso, presentadas de forma cronológica:

1. Extracción de materias primas.
2. Procesamiento de materias primas.
3. Fabricación del producto.
4. Transporte.
5. Puesta en obra.
6. Mantenimiento.
7. Disposición del residuo.

El ciclo común de los materiales de construcción es un ciclo lineal (Figura 1), que comienza en la extracción de materias primas y acaba en la deposición del residuo. Como vemos, este ciclo necesita ser recargado continuamente con nuevos recursos y depositar todos los residuos en los vertederos. Si tenemos en cuenta que la mayor parte de los residuos contienen fracciones *valorables* que se deben recuperar, y solamente unas pocas han de ser depositadas en vertederos controlados, concluiremos que ese ciclo lineal abierto debe ser sustituido por otro cerrado (Figura 2), más sostenible. Por lo tanto, es una demanda de la sostenibilidad aprovechar las materias y productos que contienen los residuos: hormigones y piedras artificiales, piedras naturales, cerámicas, madera, metales diversos, plásticos y vidrios, que pueden ser *valorizables*.

En la naturaleza todo se recicla. Si proyectamos las edificaciones para gestionar los recursos de forma mimética a la naturaleza imitaremos a los ecosistemas, de manera que proyectaremos para reusar y reciclar todo lo que fabricamos y construimos como humanos en nuestro entorno, reintegrando los recursos de la manera más útil. Siguiendo este argumento, tenemos dos alternativas. La primera emula el ciclo productivo a un biociclo, lo más integrado posible con el ciclo natural. La segunda alternativa es el tecnociclo, que viene determinado por un sistema productivo basado en el reciclado y reutilización de todos los materiales formando así un ciclo tecnológico diferente del ciclo natural. Se pretende alcanzar un sistema productivo que tiende a reducir a cero las entradas y salidas entre el sistema tecnológico y el natural, que en realidad no es del todo posible por la entropía del sistema.

La calidad del producto del sistema biocíclico viene limitada por su naturaleza orgánica. Las materias que lo componen se reincorporan al ciclo natural mediante la descomposición orgánica, es el caso de los residuos de origen vegetal de madera. Sin embargo, la naturaleza dominante de los materiales de construcción es mineral, y una vez transformados son difícilmente reintegrables a los ciclo naturales, aunque pueden incorporarse al ciclo biotecnológico.



CONCEPTO: Entran materias primas y recursos, salen residuos

Fig. 1. Ciclo Lineal de los materiales.

TÉCNICAS Y SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN COMPATIBLES CON NUESTROS OBJETIVOS

CONSTRUIR

MATERIALES Y RECURSOS

DESCONSTRUIR

RECICLAR / REUTILIZAR

CONCEPTO: Materiales y residuos circulan en un sistema cerrado

Fig. 2. Ciclo Cerrado de los materiales.

2.2. Posibilidades del ciclo de los residuos.

Al final del ciclo de vida de los materiales y productos de la construcción la cantidad de residuos que de forma innecesaria van a parar a los vertederos es excesiva. Recordemos que en países como España el volumen de residuos que se depositan en los vertederos es superior al de los residuos urbanos.

La industria de la construcción tiene un problema de producción de residuos que es tan importante como el de los recursos y de la energía porque los residuos, además de ser un estorbo, son una fuente de recursos subexplotada. De manera que deberemos prestar tanta atención a la cadena de producción como a la de los residuos.

La Unión Europea se planteaba alcanzar en el año 2010 el 70-80% de valorización de los residuos de construcción y demolición. Es obvio que todavía nos queda mucho camino por recorrer hasta alcanzar esos valores.

La jerarquía de opciones de gestión de los residuos de demolición nos da una idea más clara de qué alternativas tienden a una entropía menor, es decir, el índice de aprovechamiento de los residuos es más alto. Naturalmente el aprovechamiento máximo del edificio o construcción con una mínima transformación es la cumbre de esta jerarquía. A medida que la construcción y sus elementos pierden la forma inicial, el desorden material de los residuos -digamos entropía- crece.

A continuación exponemos los cuatro niveles de jerarquía que van del más al menos eficiente.

2.2.1. Reutilización del edificio

El nivel más alto de recuperación de los materiales de un edificio se da cuando se recupera en su total integridad. Este cambio puede ser in situ y hablaríamos de una rehabilitación o restauración. En el caso en que el edificio cambia de lugar para ser utilizado nuevamente casi siempre con el mismo uso, estamos hablando de una relocalización. Este nuevo uso, como edificio transportable, ocurre cuando se necesita un edificio por tiempo limitado y luego puede ser reutilizado en otro lugar para el mismo uso o semejante.

2.2.2. Reutilización de componentes en el propio edificio o en otro

El segundo nivel de recuperación de los residuos es la reutilización de componentes en un nuevo edificio o en otro lugar del mismo edificio. Incluye revestimientos de fachadas, particiones interiores, etc. que tienen una forma estandarizada. De hecho, son componentes intercambiables y pueden ser manipulados fácilmente. Este escenario ahorra recursos, residuos y energía utilizada durante la fabricación del material, así como la energía utilizada durante la manufactura y transporte.

2.2.3. Material reutilizado en la fabricación de nuevos componentes

El tercer nivel es el del reprocesado de materiales en nuevos componentes, que incluye también productos todavía en buenas condiciones, que pueden ser utilizados en la fabricación de nuevos componentes. La madera es un caso paradigmático, se reutiliza en aplicaciones semejantes pero en dimensiones menores a la del componente original. La ventaja de esta alternativa es que la energía consumida en la recuperación del componente es menor que en el reciclado del residuo.

2.2.4. Material reciclado en nuevos materiales

El nivel más bajo es el del reciclado de recursos para fabricar nuevos materiales que se utilizan en sustitución de los recursos naturales en la fabricación industrial. El paradigma de esta alternativa en la construcción es el reciclado del hormigón armado en árido para relleno de bases y subbases de pavimentos, trasdosados de muros, etc. No obstante, aunque se mejora la presión sobre el consumo de recursos y los problemas derivados de la producción de residuos, el consumo final de energía y la contaminación relacionada puede ser en realidad mayor que si se utilizan nuevos recursos.

3. La desconstrucción

3.1. Gestión de residuos

En el apartado anterior hemos visto que el modelo dominante del ciclo de vida de los materiales de construcción y componentes es un sistema lineal, que finaliza en la demolición y eliminación del residuo. No obstante, si en lugar de demoler una construcción de forma poco selectiva realizamos una *desconstrucción*, aumentaremos los materiales y componentes que pueden ser reusados y reciclados, en definitiva, nos acercaremos al cierre del ciclo de los materiales.

Este nuevo proceso propone un ciclo de vida diferente, que incrementa el tiempo de vida útil de los recursos materiales utilizados en la construcción. Para incrementar el ciclo de vida de los materiales y componentes, los proyectistas deben diseñar edificios para ser *desconstruidos* de la forma más eficiente con el fin de aumentar el volumen de los residuos recuperados.

Los procesos de demolición habituales son poco adecuados al objetivo de minimizar los residuos que se originan en el derribo del edificio. Estos procesos son intensivos en tecnología para la destrucción masiva e indiferente del edificio, por lo que los residuos tienen poco valor económico, incluso algunos están mezclados con otros nocivos o tóxicos. En consecuencia, la única alternativa que queda es depositarlos en un vertedero. En cambio, los procesos de *desconstrucción* reducen los

residuos que se producen en la demolición de forma que es una alternativa más sostenible para el medio ambiente.

Definiremos la *desconstrucción* como el conjunto de acciones de desmantelamiento de una construcción que hacen posible un alto nivel de recuperación y aprovechamiento de los materiales, para reincorporarlos nuevamente en las construcciones. Su finalidad es disminuir el impacto ambiental de las actividades del conjunto del sector, principalmente la reducción de los residuos inertes que innecesariamente se incorporan a los vertederos.

De forma general podemos identificar la *desconstrucción* con el conjunto de acciones que mejoran la viabilidad de los procesos de valorización de los residuos y en consecuencia, reducen el impacto ambiental que se origina en la fabricación de nuevos productos.

El proceso de *desconstrucción* debe satisfacer dos principios [4]:

1. Debe facilitar la división y recogida selectiva de los residuos para favorecer su reciclaje y valorización posterior.
2. Es un desmontaje gradual y selectivo del edificio que se desarrolla en sentido inverso al de su construcción lógica, para mantener la seguridad de las personas que participan.

De manera coherente con los dos principios anteriores las etapas que debe seguir el proceso de *desconstrucción* son:

- Desmontaje de los materiales potencialmente peligrosos para la salud humana y el medio ambiente.
- Desmontaje de los elementos arquitectónicos recuperables que no forman parte de la estructura del edificio ni son soporte de otro elemento.
- Desmontaje de los materiales y elementos reciclables, que como en la etapa anterior, no tienen función de soporte.
- Desmontaje de los elementos que forman parte de la estructura o son soporte de otro, previo apuntalamiento.
- Derribo masivo de la estructura del edificio, con técnicas y métodos que faciliten la selección “in situ” de los materiales para hacer más fácil la valorización posterior.

Las posibilidades de aprovechamiento de los residuos de demolición son diversas:

- Reutilización de los elementos arquitectónicos, que se recuperan completos o en parte, con un mínimo de operaciones de adaptación o transformación
- Reciclaje de los residuos no mayoritarios de la construcción; es decir, los que no son de naturaleza pétrea: madera, metales plásticos, etc.
- Reciclaje de los residuos de naturaleza pétrea que, actualmente, son los mayoritarios en la construcción: hormigones, cerámicas, piedras, etc.

La recuperación de los residuos potencialmente peligrosos por razones de toxicidad debe conducir al aislamiento de los residuos peligrosos, para posteriormente realizar un tratamiento especial o transporte a un vertedero específico. En conjunto, la desconstrucción presenta una serie de ventajas (puntos fuertes) y algunas desventajas (puntos débiles), que son:

Puntos fuertes de la desconstrucción

- Gestión de materiales peligrosos.
- Reducción de los residuos que van a parar a los vertederos.
- Actividad económica en el entorno de los materiales reutilizados.
- Preservación de los recursos vírgenes.
- Eliminación de estructuras ineficientes y obsoletas.
- Reducción de las molestias de la demolición.

Puntos débiles de la desconstrucción

- Exige aumentar la seguridad de los trabajadores.
- Requiere más tiempo de ejecución.
- Requiere espacio para almacenamiento de los materiales recuperados.
- Faltan estándares para la reutilización de ciertos materiales recuperados.
- La falta de demanda establecida mediante cadenas de suministro.

3.2. Las capas del edificio

Una manera de entender el edificio, para ordenar de forma más eficiente el proceso de *desconstrucción* parcial o total, es considerarlo como la sucesión de capas funcionales, y relacionarlas con su ciclo de vida útil. La identificación de la durabilidad de las capas permite estructurar los componentes del edificio y sus relaciones de dependencia en un sistema que a lo largo de su vida facilitará las decisiones de cambio técnico y funcional e incluso de imagen. De esta forma, también la *deconstrucción* parcial del edificio -con el fin de mejorar sus prestaciones y durabilidad- hace más eficientes los recursos utilizados y reduce los residuos generados.

Podemos descomponer el edificio en una jerarquía de capas y asignarle una durabilidad determinada. La primera capa es el propio terreno donde se edificará, que consideramos permanente. La última es el mobiliario, que puede estar sometido a cambios en períodos cortos, tan solo días o meses. Para nuestra exposición solamente nos referiremos a las capas formadas por la estructura, envolventes y servicios, que son los elementos técnicos principales de la composición del edificio.

1. La estructura está formada por las cimentaciones, sistemas de contención de tierras y la estructura propiamente dicha. Lo que podríamos llamar la obra gruesa. Podemos establecer su duración o vida útil en

un período que va desde los 30 años a los 300 años, que depende de los materiales y sistemas de construcción.
2. La envolvente del edificio es el cerramiento y el suelo inferior (excluidos los entrepisos). Con una expectativa de vida de 20 años, en función del mantenimiento, cambios funcionales, técnicos y de imagen.
3. Las instalaciones de acondicionamiento ambiental y canalizaciones propiamente de servicios técnicos de fontanería, electricidad, gas, datos,..., tienen una expectativa de vida de entre 10 y 15 años.

La identificación de la durabilidad de las capas en la concepción del edificio permite incorporar una gestión más eficiente de los recursos materiales utilizados en edificio. Facilita la programación del mantenimiento y sustitución de elementos, y la gestión de los residuos. El edificio pensado así es un organismo en evolución técnica, y facilita las transformaciones funcionales necesarias para alargar el ciclo de vida.

3.3. Viabilidad económica y ambiental

Un aspecto relevante de la *desconstrucción* es la viabilidad económica del proceso frente a la demolición convencional. Se trata de un equilibrio coste/beneficio ambiental que no depende exclusivamente de los factores de producción comunes, sino de lo que la sociedad en cada momento decide que está dispuesta a pagar por la salud humana y medioambiental.

Si el desmontaje de los componentes es fácil, disminuye el coste de los procesos de reparación, adaptación, refabricación, reutilización, reciclaje, compostaje o incineración. Cuando el objetivo principal del desmontaje es el reciclado de los materiales, la viabilidad de la ecuación contable depende de las variables del coste del material virgen y de los de depósito en el vertedero.

El análisis de la evolución temporal de la variable del coste del depósito nos confirma que es un valor en proceso de cambio, en el marco de las tendencias legislativas en temas de medio ambiente. El coste de las operaciones de *desconstrucción*, reutilización y reciclado de los residuos y del depósito en el vertedero del resto no valorizable, puede ser compensado con los beneficios económicos del resultado final. El resultado económico varía de un lugar a otro. Así, en un país puede resultar viable económicamente pero en cambio en otro puede no serlo. La diferencia del resultado final no depende tanto de los costes materiales de las operaciones como del coste del depósito en el vertedero. Y esta variable está en función de la internalización de los costes ambientales que cada sociedad incorpora en el precio del depósito.

En cuanto a la viabilidad económica, la eficiencia del ciclo también depende de la reducción del coste derivado del tiempo de ejecución de la *desconstrucción* y a su vez, de la valorización económica del material recuperado. Ambos propósitos pueden ser contradictorios. Si destinamos más tiempo a la separación, obtendremos un material más puro generalmente de mayor valor, pero habremos aumentado el coste de gestión de los residuos. Así pues, hay que optimizar el coste y el tiempo de desmontaje para mejorar la viabilidad del material obtenido. Cuanto más puro es el residuo, más conserva las características y prestaciones originales, de modo que su valor de mercado es más próximo al del material virgen. La relación entre reciclaje y la intensidad de la *desconstrucción* nos ayuda a identificar el valor óptimo de las variables. Analizando los costes de la *desconstrucción*, del reciclado y de la reutilización de componentes, y del depósito en el vertedero podemos identificar el punto óptimo de viabilidad económica.

4. Proyectar para desconstruir o la construcción de la desconstrucción

4.1. La ecología industrial

La ecología industrial (EI) considera el sistema industrial como un ecosistema natural. La EI pretende asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales a los naturales, de manera que tiendan a cerrar el ciclo de la materia y hacer eficientes los procesos internos. Se presenta como una de las formas más pujantes en las que la industria puede contribuir al desarrollo sostenible [6].

La visión sistémica ha sido una de las aportaciones de la ecología industrial, que es uno de los paradigmas para alcanzar el desarrollo medioambiental sostenible. Sus objetivos no pueden ser otros que reducir el consumo de materias y de energía hasta unos valores que puedan ser reemplazados; y reducir las emisiones de residuos hasta otros que la biosfera pueda admitir.

Una de las estrategias técnicas para alcanzar los objetivos de la EI es el diseño para la refabricabililad. Bajo este nombre genérico se desarrollan estrategias más definidas, que conocemos por “Designs for…” entre la que destacamos el “Design for disassembly” (Dfd) que traduciremos como el proyecto para el desmontaje. La aplicación de los criterios de Dfd también tiene una aplicación directa en la construcción de edificios [3].

Así, en este apartado vamos a enunciar principios de actuación basados en el proyecto para el desmontaje que utiliza la industria manufacturera. En el siguiente apartado desarrollaremos la aplicación específica en la arquitectura.

Los factores que determinan los procesos de desmontaje en la industria son varios, destacaremos los más importantes:

- La diversidad de materiales diferentes que componen el producto.
- La reversibilidad de los sistemas de unión entre materiales y componentes.
- Las características de las partes o piezas (físicas, mecánicas, de tamaño, peligrosidad, etc.).
- El destino de las piezas (incineración, reciclado, reutilización, etc.).
- La productividad y competitividad del proceso (costes materiales, tiempo necesario, calidad final, etc.).

Con el objeto de minimizar y facilitar las operaciones de desmontaje y separación selectiva en los productos -por lo tanto su viabilidad económica- se deben observar unos principios derivados de la forma o arquitectura del producto; de la forma de los componentes y de las partes; y de las características de las uniones y su funcionamiento. El conjunto de principios y recomendaciones que hemos expuesto -de la ecología industrial- proponen sistemas y técnicas de construcción que pueden incorporarse a la edificación mediante la *desconstrucción.*

4.2. La construcción de la desconstrucción

Las experiencias de *desconstrucción* realizadas y el propio sentido común permiten establecer un axioma inicial *"la construcción más adecuada con el medio ambiente es la que ha sido pensada para ser desconstruida".* Porque la construcción que no ha sido pensada para ello, sobre todo si se trata de una construcción basada en la adherencia química entre materiales -obra de fábrica, enyesados, revocos, hormigones- no es fácil de desconstruir. La eficiencia en la separación selectiva de los materiales en la propia obra es muy baja, de forma que compromete la viabilidad económica del proceso.

La *desconstrucción* es un proceso que sugiere técnicas y sistemas de construcción más sostenibles con el medio ambiente. Para incrementar su efectividad, la construcción debería estar pensada para ser desconstruida. De forma que la construcción más fácilmente desconstruible debería seguir las recomendaciones siguientes:

- La simplicidad de la estructura y de la forma construida facilita el desmontaje parcial y la desconstrucción.
- Los materiales de construcción que tienen una composición más homogénea son los que originan residuos más fácilmente valorizables.
- La construcción formada por materiales fácilmente separables mejora las posibilidades de reutilización en los residuos de construcción.
- Diferenciar la estructura del cerramiento y el elemento portante del elemento soportado.
- La unión por adherencia química de los materiales de diferente naturaleza, en general, no hace viable la valorización de los residuos de ninguno de los materiales.
- La construcción que utiliza técnicas de unión en seco (clavado, atornillado,…) es más fácilmente desmontable.
- Las conducciones de las instalaciones de servicios no deben ser empotradas, para que puedan desmontarse sin afectar a la obra.
- Los criterios de coordinación dimensional facilitan el intercambio y reutilización de elementos de construcción como componentes en otras obras.
- Los elementos de construcción hechos en taller originan menos residuos que los ejecutados en la misma obra y, además, son más fácilmente reciclables.
- Los elementos de construcción a base de materiales tradicionales de gran sección son una solución constructiva que permite incorporar cantidades importantes de granulados reciclados de construcción.

Para alcanzar los objetivos parciales definidos en el apartado anterior es necesario cambiar el paradigma técnico del edificio. El arquitecto debe proyectarlo como un ente dinámico y abierto, que pueda adaptarse fácilmente a las necesidades de cambio. En consecuencia, debe favorecer la capacidad de transformación del edificio y sus componentes durante el ciclo de vida completo.

A modo de resumen describiremos las estrategias generales de proyecto para la desconstrucción y su relación con las alternativas de gestión de los residuos:

- Utilizar materiales y productos que no sea necesario procesar "in situ".
- Seleccionar materiales y productos reutilizados o reciclados.
- Seleccionar materiales y productos reutilizables o reciclables.
- Prever la fácil desconstrucción del edificio.
- Los edificios deben ser de uso versátil para ser reutilizados al final de su ciclo de vida funcional.

5. Ámbitos complementarios entre industrialización y sostenibilidad

Hemos visto en el apartado anterior que las características generales de la construcción de la *desconstrucción* apuntan hacia la utilización de técnicas y sistemas más industrializados que los que se utilizan en la construcción convencional. De manera que podemos establecer ámbitos en los que las características de la industrialización de la construcción y la demanda de sostenibilidad son compatibles.

Un desarrollo particular de las estrategias generales la exponemos en la siguiente Tabla 1, de Crowther [1] [2].

El recorrido de los aspectos contenidos en dicha tabla nos permite constatar que en lo principal están relacionados con los sistemas y técnicas de la construcción industrializada.

En síntesis, todos estos principios se pueden entender como desarrollo de dos ideas básicas de la construcción industrializada:

1. Mayor racionalización de la construcción:

- Utilizar componentes estandarizados y modulares.
- Minimizar el número de diferentes tipos de materiales y componentes.
- Evitar acabados secundarios de los materiales.
- La organización del espacio y de los elementos según tramas de ordenación.
- Construir mediante adición de capas.
- Aumentar la calidad de la construcción y de la durabilidad de los materiales.

2. Sustitución de las técnicas artesanas por los sistemas industrializados [5]:

- Utilizar componentes prefabricados que generen pocos residuos en obra.
- Prefabricación y producción en grandes series.
- Diseño modular.
- Utilización preferente de sistemas de construcción ligeros
- Mecanización frente artesanía.
- Sistemas constructivos compatibles entre sí, no cerrados.
- La importancia de la solución de conexión entre los componentes.
- Utilizar uniones fácilmente reversibles.
- Evitar materiales adheridos que dificultan el reciclado de los residuos.

Tabla 1
Traducción al castellano de Tabla de Crowther por J. M. González Barroso [1]
PRINCIPIOS DEL DISEÑO DE LA DESCONSTRUCCIÓN Y LA JERARQUÍA DEL RECICLAJE

Legenda-nivel de relevancia: ● alta relevancia • media relevancia · sin relevancia

No.	Principio	Reciclaje de los materiales	Descomposición de los componentes	Re-uso de los componentes	Re-configuración y re-localización del edificio
1	Uso de materiales reciclados y reciclables	●	●	·	·
2	Minimizar el número de diferentes tipos de materiales	●	●	·	·
3	Evitar los materiales tóxicos y peligrosos	●	●	·	·
4	Subconjuntos del mismo material son inseparables	●	●	·	·
5	Evitar los múltiples acabados en los materiales	●	●	·	·
6	Identificar los diferentes tipos de materiales	●	●	·	·
7	Minimizar los diferentes tipos de componentes	·	•	●	●
8	Uso de las juntas mecánicas y no químicas	·	●	●	●
9	Uso de los sistemas abiertos, no cerrados	·	·	●	•
10	Diseño modular	·	·	●	•
11	Diseñar para el uso de las herramientas comunes y estándar, evitar las herramientas especiales	·	•	●	●
12	Separar la estructura de los cerramientos para el ensamblaje en paralelo	·	·	●	•
13	Facilitar el acceso a todos los componentes y las conexiones	•	•	●	●
14	Diseñar el tamaño de los componentes para adaptarse a los medios de manipulación	·	•	●	●
15	Proporcionar un medio de manipulación y localización	·	·	●	●
16	Proporcionar las tolerancias para montaje y desmontaje	·	·	●	●
17	Uso del mínimo número de conectores	·	•	●	●
18	Uso del mínimo número de diferentes tipos de conectores	·	•	●	●
19	Diseño de los componentes y conexiones para reutilización	·	·	●	●
20	Facilitar el desmontaje de diferentes subconjuntos y componentes en paralelo	•	•	●	•
21	Identificar el tipo de componente	·	•	●	•
22	Utilizar una rejilla estándar estructural para configurar salidas	·	·	·	●
23	Utilizar la prefabricación y la producción masiva	·	·	●	●
24	Uso de materiales y componentes ligeros	●	●	●	●
25	Identificar los puntos de desmontaje	·	•	●	●
26	Proporcionar el ahorro y almacenamiento in-situ durante el proceso de desmontaje	·	·	·	●
27	Mantener toda la información de los componentes y materiales	·	·	•	●

6. Casos prácticos. Proyectos

6.1. Caso 1: El reciclado de materiales de diversa procedencia en la construcción.

Proyecto WOBO. Arquitecto John Habraken. Holanda, 1963.
Pabellón de Feria. Arquitectos Miniwiz Sustaninable Energy Developement. Taipei, 2010.

La construcción históricamente ha reciclado sus propios residuos en las nuevas construcciones. Ha sido así hasta la aparición de los materiales como el hormigón, acero y vidrio, y de la creencia en la abundancia de recursos materiales de la sociedad actual. Pero la construcción también es consumidora de residuos originados en otras actividades. Hay construcciones a base de neumáticos reutilizados y, como en este caso, de botellas.

A principios de los años sesenta el señor Heineken había viajado a los países del Caribe y le sorprendió la cantidad de botellas vacías de cerveza que se depositaban en las playas sin posibilidades de reutilizarse de alguna forma, cuando en estos países hacían falta materiales de construcción.

Heineken encargó al arquitecto John Habraken el diseño de un ladrillo para la construcción a partir de la propia botella, que es un precedente de lo que hoy diríamos ecodiseño. WOBO pretendía ser una respuesta al doble problema de la generación de residuos y a la falta de materiales para la construcción de las viviendas simples. El lema era “el ladrillo que contiene una cerveza”.

Habraken transformó la forma cilíndrica de la botella mediante dos superficies planas enfrentadas que sirven de apoyo de un ladrillo sobre el otro. Entre ambos se dispone mortero. Como la superficie del vidrio es impermeable y tiene una adherencia baja, se mejora la textura de las superficies de contacto con pequeños resaltes. La junta vertical entre botellas se resuelve por medio de la traba geométrica y el cuello de la botella se inserta en la base de la siguiente. A pesar de que en 1963 se fabricaron 100.000 botellas, la empresa no apoyó más el proyecto y hoy solamente se conserva un cobertizo y una pequeña construcción en el museo Heineken de Ámsterdam.

La idea de la construcción con botellas ha sido retomada en diversos proyectos, algunos de aspecto más folclórico que otra cosa. No obstante, hay experiencias recientes que van más allá de la reutilización de la botella común y plantean el diseño de la propia botella aprovechando la ventaja de la fabricación mediante inyección de plástico en un molde, que permite definir una geometría más compleja y eficiente.

En el ejemplo que presentamos (Fig. 3), las botellas son de tereftalato de polietileno PET, que es el material más habitual de las botellas de agua. La botella está fabricada con el material reciclado de otras, tiene una capacidad de dos litros. La mitad superior de la botella tiene una sección complementaria de la inferior, de manera que quedan encajadas entre ellas. El conjunto de las botellas quedan unidas entre sí mediante un geotextil a las dos caras fijadas con el propio tapón. La pared está fijada a una subestructura de perfiles metálicos. Las botellas llevan luces led incorporadas en su interior. Con estas botellas se han resuelto los muros de fachada del pabellón realizado para la Feria Taipei International Flora Expo 2010, de 2186 m² de superficie en planta.



Fig. 3. Proyecto WOBO y Pabellón para la Feria Taipei Internacional Flora Expo 2010. Fuente [7] [8].

6.2. Caso 2: El reciclado de residuos pétreos y el hormigón reciclado.

Residencia de estudiantes. Barcelona, 2007.

Los materiales dominantes de la masa de los edificios tienen naturaleza pétrea, concretamente son piedras artificiales: hormigón y cerámica. En los edificios convencionales hasta el 90% de su masa está formada por esos materiales. Así, el éxito en la reducción de los residuos de demolición estará vinculado a la gestión de los residuos pétreos. Aunque estos residuos en sí mismos tienen poco valor económico, su reducción es necesaria si no pretendemos llenar innecesariamente los vertederos.

Los áridos reciclados procedentes de residuos de demolición tienen una aplicación directa en las bases y sub-bases de firmes de caminos y carreteras. También en la edificación. En nuestro caso vamos a tratar la aplicación del árido reciclado en la fabricación del hormigón armado.

Las posibilidades de los áridos reciclados en la composición del hormigón estructural están recogidas en la *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), Anejo 15. Recomendaciones para la utilización de áridos reciclados.* En la instrucción se recomienda limitar al 20% la cantidad de árido procedente del machaqueo de residuos de hormigón, de manera que las propiedades del hormigón no son apenas afectadas. Si se prevé una cantidad superior de árido reciclado se deben realizar estudios y ensayos

específicos para conocer las variaciones que se producen en las propiedades del hormigón. La resistencia característica del hormigón no debe superar los 40 N/mm^2, que ya es suficiente para las estructuras de edificación habituales.

Es importante fijarse en que no se admite cualquier clase de árido reciclado. En el caso de los áridos deben ser de hormigón y se debe tener especial cuidado si el hormigón ha sido enyesado. La norma no autoriza la fabricación de nuevos hormigones con esos áridos por ataques de los sulfatos en forma de yeso. El exceso de yeso en el amasado del nuevo hormigón produce estringita o sal de Candlot que es expansiva y daña el hormigón.

Naturalmente para poder reincorporar los residuos del hormigón al ciclo de la construcción, la manera más efectiva es utilizar estructuras masivas de hormigón, como las formadas mediante muros y forjados macizos. También hay que tener en cuenta que el hormigón fresco transportado mediante camión es una manera muy eficiente de transportarlo, frente por ejemplo, al transporte de módulos de 3D prefabricados. El transporte del hormigón fresco en cuba presenta una relación baja entre la energía consumida y su masa. Hay que considerar que en el construcción modular, se mueven grandes volúmenes de aire.

Existen desde hace tiempo técnicas de puesta en obra de masas de hormigón mediante el sistema de grandes encofrados que se trasladan a la obra. Es lo que llamamos habitualmente la industrialización “on site”: en la obra. En las imágenes que presentamos (Fig. 4), la estructura del edificio fue realizada mediante grandes encofrados metálicos del sistema semi-tunel, que permite una puesta en obra rápida del hormigón. Estas estructuras son una buena oportunidad para incluir áridos procedentes de reciclado.






Fig. 4. Hormigón reciclado. Proyecto de Residencia de estudiantes en Barcelona.

6.3. Caso 3: Reutilización de componentes de construcción.

Viviendas. Reutilización de componentes de hormigón prefabricado. Alemania, 2001.

En el estudio del caso anterior hemos considerado las posibilidades de reciclado de los residuos de origen pétreo como áridos reciclados para nuevos hormigones. En este caso el nivel de valorización del residuo es más alto porque se trata de la reutilización de grandes paneles prefabricados de hormigón para la construcción de nuevas viviendas.

La propuesta consiste en reutilizar los paneles como componentes de muros y forjados en edificios nuevos. Su origen era la necesidad de derribar los edificios de viviendas obsoletos construidos con paneles prefabricados de hormigón armado en la antigua RDA. Estos grandes bloques de viviendas -semejantes a los bloques de viviendas construidos en los años sesenta en la URSS, de ochenta viviendas y cinco plantas de altura- estaban construidos mediante muros y forjados de paneles prefabricados de hormigón.

La primera experiencia piloto de aplicación fue en 2001. Los edificios eran viviendas nuevas de dos plantas de altura. La estructura era de muros y forjados de paneles prefabricados de hormigón, que provenían del desmontaje mediante corte de los paneles prefabricados de las viviendas a derribar. Es decir, se trataba de la desconstrucción del edificio mediante el corte de muros y forjados para reutilizarlos del mismo modo en nuevas edificaciones.

Aunque los paneles de hormigón habían reducido sus prestaciones mecánicas debido a la disminución de durabilidad del hormigón -después de cuarenta años sin apenas mantenimiento- todavía tenían una resistencia residual suficiente para soportar las acciones estructurales de un edificio de menor altura.

En relación a las otras exigencias de los muros de fachada, principalmente de estanqueidad y aislamiento térmico y naturalmente de ahorro del consumo de energía en la climatización del edificio, el muro fue doblado por el exterior a base de un material de aislamiento acabado con un revestimiento adherido tipo ETIC.

La discusión se plantea en términos de comparación de las ventajas e inconvenientes de la reutilización de componentes de hormigón prefabricado frente a la alternativa de reciclar los residuos de hormigón como áridos reciclados. Los proyectos experimentales realizados permitieron constatar hasta una reducción del coste material de ejecución de un 26%, aunque, es evidente que variables como las distancias de transporte de los paneles, los formatos utilizados, el estado de durabilidad y fiabilidad del hormigón modifican a favor o en contra el balance económico.

En cuanto a los aspectos de mejoras ambientales, la utilización del panel prefabricado evita la fabricación de nuevo cemento para el amasado del hormigón. Por lo tanto, se reduce el consumo de energía en la fabricación del








Fig. 5. Reutilización de componentes de hormigón prefabricado. Viviendas. Alemania, 2001. Fuente [9]

cemento del panel y de las emisiones contaminantes a la atmósfera. En el caso del árido reciclado es necesario la fabricación del cemento y el amasado del hormigón. En definitiva, el impacto ambiental más alto.

6.4. Caso 4: Reutilización de componentes de sistemas constructivos industrializados.

Moduli. Sistema constructivo experimental. Arquitectos Kristian Gullichsen y Juhami Pallasmaa. Finlandia, 1968-1973.

El sistema Moduli se diseñó en un momento en que se valoraba la autoconstrucción a partir de elementos estándar, fabricados en serie y de amplio alcance. Moduli era un sistema de construcción industrializada tipo Mecano -o más bien, parecido a un juego LEGO de arquitectura- que tiene unas características que todavía hoy nos permite presentarlo como una alternativa de la construcción sostenible (Fig. 6).

El sistema Moduli, aparte de estar totalmente realizado en madera, es un ejemplo de construcción versátil. Esta característica permite a la vivienda configurarse y volverse a configurar a la medida del usuario. Por un lado, permite realizar viviendas de diferentes tamaños y espacios, y además, adaptarse a los cambios de uso, ampliación y reducción de la vivienda. En definitiva, incrementa la vida útil del edificio, ya sea funcionalmente, o de los componentes mediante la sustitución de las partes deterioradas con el uso.

La base de este sistema está más en su configuración geométrica que constructiva. La composición modular de los elementos se manifiesta en un catálogo de componentes de funciones diferentes, paneles opacos, con oberturas, celosías, etc. Estos se coordinan entre sí mediante la definición de un módulo en 3D de tres lados iguales. Cada módulo a su vez se descompone en otros tres submódulos y estos, en otros tres más, que da lugar a una variedad formal y funcional extensa.

La construcción se parece más a un montaje que a la técnica de aparejar como en la construcción de obra de fábrica tradicional. No obstante, para que se produzca el necesario escenario de compra de nuevos elementos y reutilización de otros, es preciso que exista un mercado suficiente de demanda. En definitiva, que el sistema tenga un cierto éxito y sea aceptado como sistema de construcción común. Si no es así, el flujo necesario de intercambio de componentes para dar respuesta a las cambiantes formas de vida y uso familiar no es posible. El sistema cerrado se acaba en sí mismo.

Moduli fue un sistema inventado años antes de que se definieran las demandas de sostenibilidad, aunque como ejemplo conceptual todavía conserva su validez. En la práctica, el sistema no tuvo el éxito esperado, la explotación económica no fue rentable y tan sólo se construyeron sesenta viviendas, de manera que no alcanzó el volumen suficiente para ser una propuesta viable. Pero hoy todavía constituye un buen ejemplo de las posibilidades de los sistemas tipo Mecano analizados desde las demandas de la sostenibilidad.

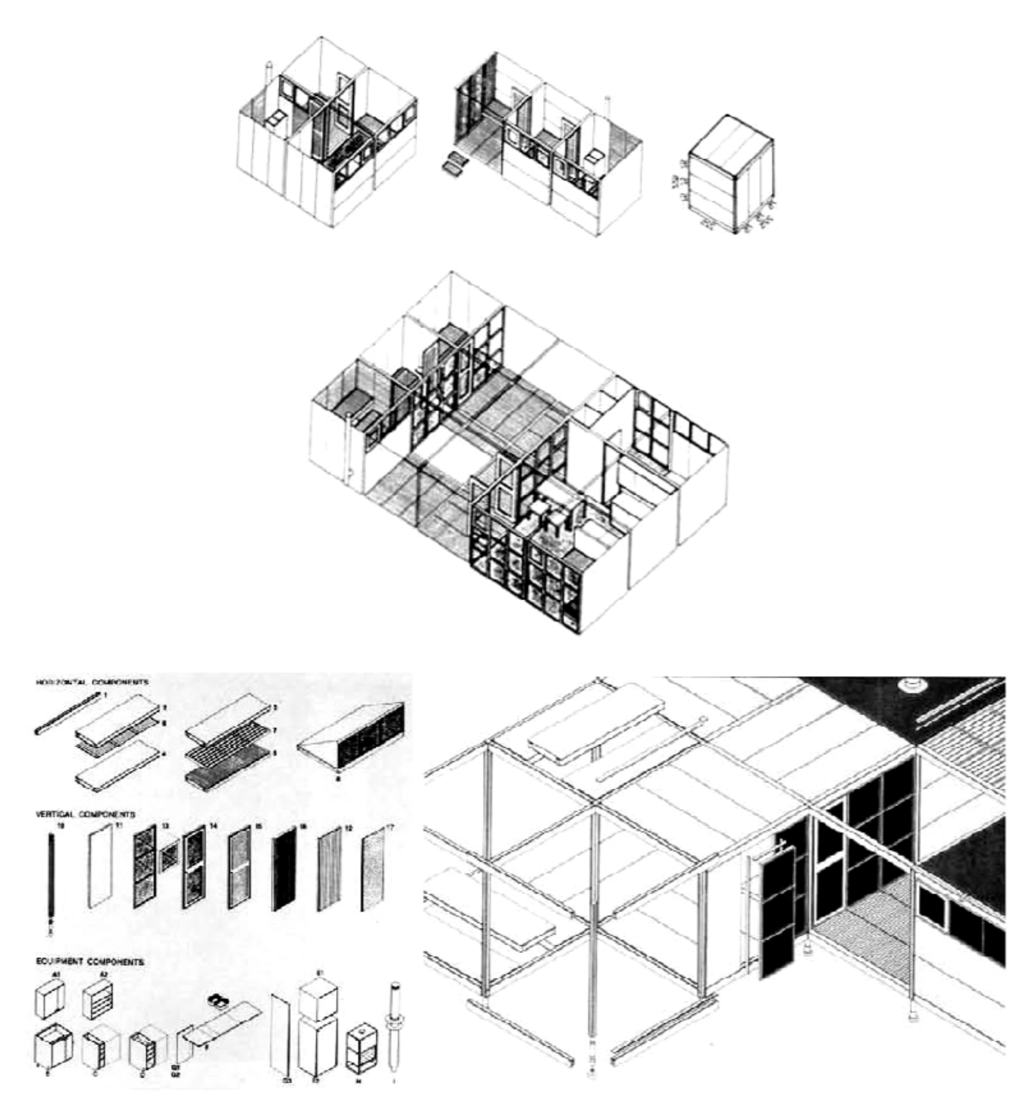


Fig. 6. Moduli: sistema constructivo experimental, Finlandia, 1968-1973.
Fuente [10]

6.5. Caso 5: La fachada industrializada de Lacaton y Vasal

Instituto Universitario de Grenoble. Arquitectos Lacaton y Vasal. Francia, 1995-2001.

El edificio del instituto es un ejemplo de sostenibilidad de orden tipológico y técnico (Fig. 7). La estructura es de vigas de hormigón pretensado de gran luz. La geometría estructural es regular y ordenada. Está formada por la sucesión de cuatro pórticos de la misma luz entre vanos y cuatro crujías de luz semejante a la luz entre pilares. En definitiva, un espacio isótropo con pocos pilares. De esta manera, el espacio interior del edificio se convierte en un espacio neutro poco caracterizado que permite la transformación de usos necesaria para mantener la durabilidad funcional del edificio. Los espacios de los edificios de uso universitario deber ser capaces de adaptarse con facilidad a usos diferentes, laboratorios, aulas de teoría, seminarios, etc.

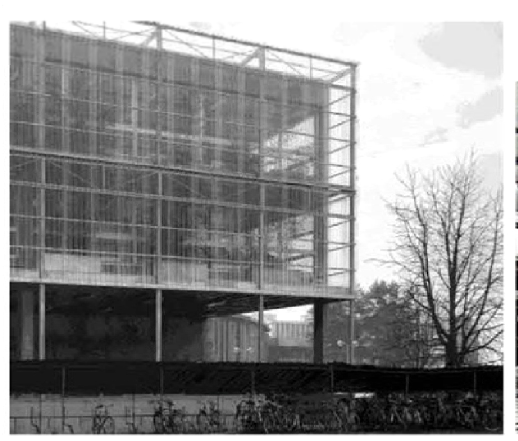
Las técnicas constructivas utilizadas en el montaje del edificio -digo montaje y no construcción, porque es más parecido a lo primero que a lo segundo- son diversas. Son técnicas de montaje en seco de grandes componentes de hormigón y de técnicas de fijación para los perfiles de acero y las placas de plástico de las fachada principal. Se trata por lo tanto, de la adición de sistemas constructivos diferentes. La estructura pesada de hormigón frente a los cerramientos de fachada ligeros, de acero y de plástico. El cerramiento de fachada a modo de umbráculo tiene la función de filtro regulable de las acciones climáticas, de luz y sol exteriores. El edificio es el resultado de unas soluciones constructivas y funcionales simples y austeras, que evidencian que la sostenibilidad en la arquitectura está lejos de la retórica.

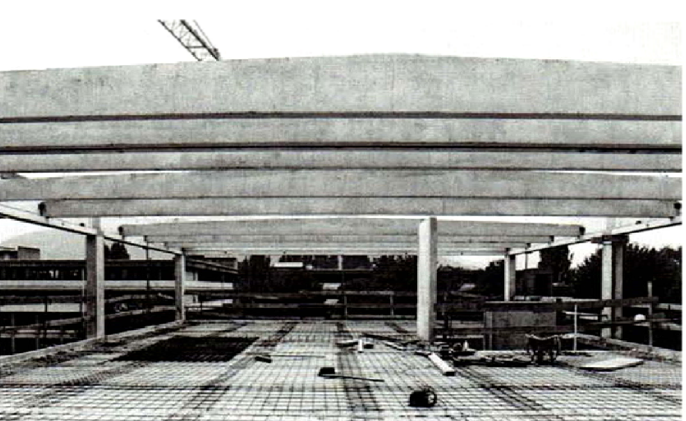
En relación a los materiales del umbráculo, el acero y los plásticos son materiales de alto impacto ambiental en su proceso de fabricación. La transformación del mineral de roca en metal y del petróleo en materiales plásticos requiere grandes cantidades de energía y son origen de altas

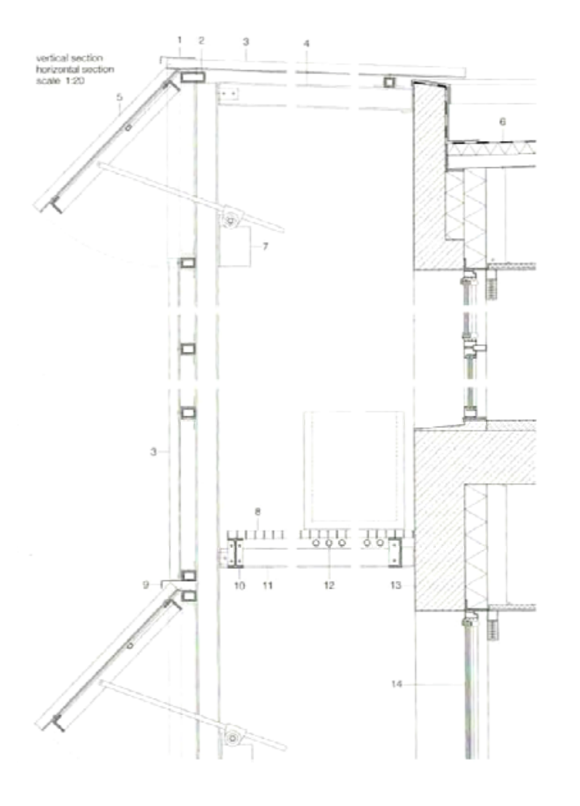
emisiones de CO_2 equivalente. El caso de los metales presenta una situación diferente a los plásticos. Los residuos ferrosos (la chatarra) tienen un valor de mercado bajo pero suficiente para que sea viable económicamente todo el proceso, desde la recogida selectiva del metal hasta la fabricación de nuevos productos con cantidades muy altas de acero reciclado. En el caso de las armaduras de acero corrugado llega hasta el 100% de material reciclado.

Los residuos de materiales plásticos, si son termoplásticos son fácilmente reciclables; no lo son sin embargo los termoestables. Cuando el material plástico ha perdido cualidades o es difícilmente reciclable, queda la alternativa de la valorización energética. Es decir, la incineración con recuperación de energía, ya que los plásticos poseen un elevado poder calorífico. No obstante, esta es una alternativa que se debe estudiar en cada caso porque puede ser origen de emisiones tóxicas o contaminantes.

El umbráculo de la fachada está formado por una subestructura de perfiles y secciones tubulares de acero galvanizado atornillados unos a otros, que permiten el desmontaje para su reutilización o reciclado. Las placas transparentes onduladas son de policarbonato, que es un plástico termoestable, difícilmente reciclable. Hubiera sido más adecuado un termoplástico, de origen reciclado o fácilmente reciclable.







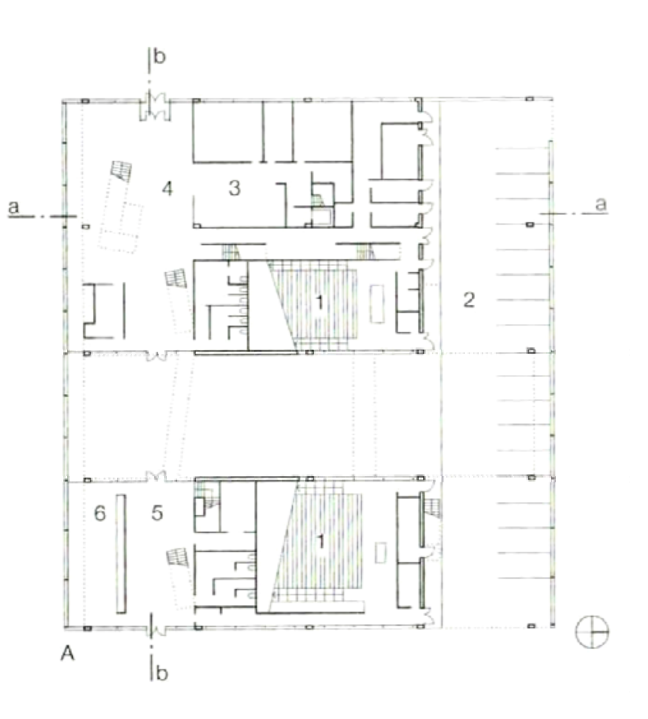


Fig. 7. Fachada industrializada de Lacaton y Vasal.
Fuente [11]

6.6. Caso 6. Técnicas de fabricación y sistemas constructivos más sostenibles

SYSTEM3. Arquitectos O.L. Kaufmann y A. Rüf / KFN Systems. Nueva York, 2008.

El System3 es un prototipo que fue presentado en la exposición Home Delivery en el MOMA de Nueva York en 2008 (Fig. 8). En realidad la industria de la madera hace tiempo que está trabajando en soluciones semejantes de manera que está suficientemente madura para fabricar propuestas de este tipo. El valor diferente de la propuesta que presentamos es la claridad del planteamiento.

El modelo de construcción industrializada dominante en las décadas de los años 1960-70 fue la prefabricación de grandes paneles de hormigón armado de forjados, paredes y particiones interiores. La reciente evolución de la construcción industrializada ha incorporado dos nuevas demandas: la sostenibilidad y la adecuación al usuario.

El SYSTEM3 es una alternativa que se adapta a las nuevas demandas y también es una alternativa industrial creíble. El sistema se presenta como más sostenible, tecnológicamente avanzado, flexible y eficiente económicamente. El material utilizado es madera, un recurso natural renovable, de bajo consumo de energía en su transformación, que presenta diversas posibilidades de valorización como elemento reutilizado, material reciclado o mediante la transformación en energía. Este argumento es característico del material en sí mismo. La diferencia cualitativa del ejemplo es que es su fabricación necesita una tecnología "blanda" versátil para producir series de pocas unidades de características geométricas diferentes y adaptables.

El espacio se forma a base de la adición de volúmenes de una planta de base rectangular. El volumen se forma mediante la unión de elementos planos: forjados, muros y cubierta. Los servicios e instalaciones se incorporan al módulo en la fábrica y se transporta completamente acabado. El volumen tiene unas dimensiones de 11,58 por 5,79 m. en todos los casos y de 12 cm. de espesor. Los paneles pueden ser adaptados en la propia obra a los cambios funcionales en el tiempo (nuevos huecos). Incluso pueden ser transportados a la fábrica para reformarlos, repararlos y realizar otros trabajos, o ser sustituidos por otros nuevos.

En la fabricación de los paneles se utilizan tecnologías de CNC. El control numérico (CNC) es un sistema de automatización de máquinas herramienta que funciona de forma coordinada con archivos de CAD. La facilidad de mecanización del panel de madera permite conformar huecos de diferentes tamaños y formas, así como diversos grados de opacidad. Desde el punto de vista industrial, la maquinaria necesaria es versátil y poco compleja. El corte automatizado sirve tanto para fabricar paneles de fachada como para cualquier elemento plano de madera que pueda ser utilizado en muebles, contenedores, etc. En resumen, es incluso una tecnología de fabricación más versátil y sostenible en su aspecto, por ejemplo, en las épocas de crisis cíclica del sector de la construcción.

Si se quiere resolver un volumen de varias plantas hay que realizar un estudio estructural y seguramente disponer de una estructura auxiliar.



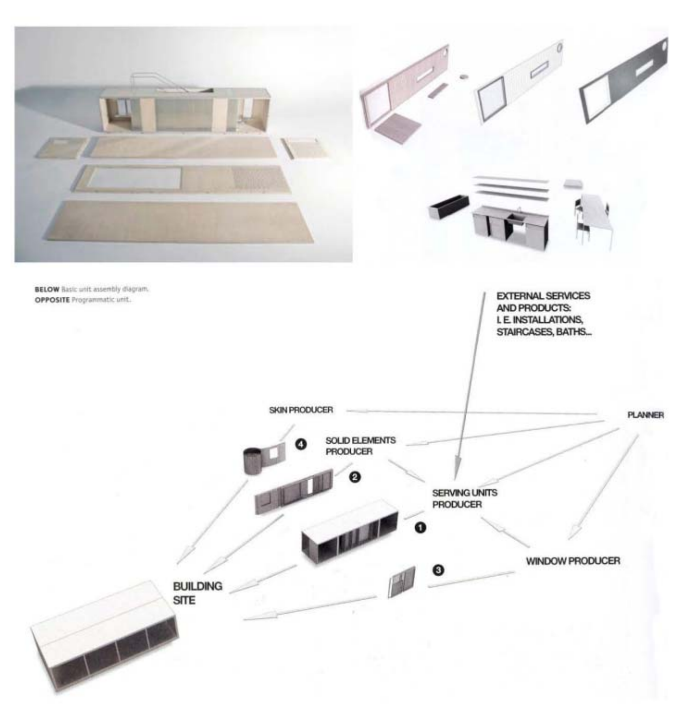


Fig. 8. System3. Nueva York, 2008.
Fuente [12]

6.7. Caso 7. El edificio en evolución. Las capas del edificio.

Osaka Gas Experimental Housing NEXT21. Arquitectos Y. Utida, Sky-Koh-Sha. Architectural & Urban Design Studio. Osaka, Japón, 1994.

El proyecto NEXT21 es un edificio experimental de 18 viviendas en Osaka (Japón) que se construyó con el fin de probar nuevos modelos de *housing* para reducir el consumo de energía y promover mejoras medioambientales mediante el tratamiento de residuos (Fig. 9). También se pensaba en viviendas que se adaptaran mejor a la diversidad de formas de vida de los residentes.

El edificio empezó a funcionar en 1994 y ha sido permanentemente reutilizado hasta hoy. Los usuarios de cada vivienda cambian cada 5 años, de manera que el

edificio ya ha experimentado cambios para la adecuación a los nuevos usuarios.

El proyecto es una aplicación de la metodología de Open Building, que tuvo origen en las propuestas de SAR y Habraken en Holanda, en la década de 1970. Desde hace quince años, con la incorporación de las nuevas demandas ambientales este concepto se ha reincorporado al debate y está en revisión. De hecho se está revitalizando porque propone la metodología para incrementar la durabilidad funcional del edificio y por lo tanto, reducir su impacto ambiental.

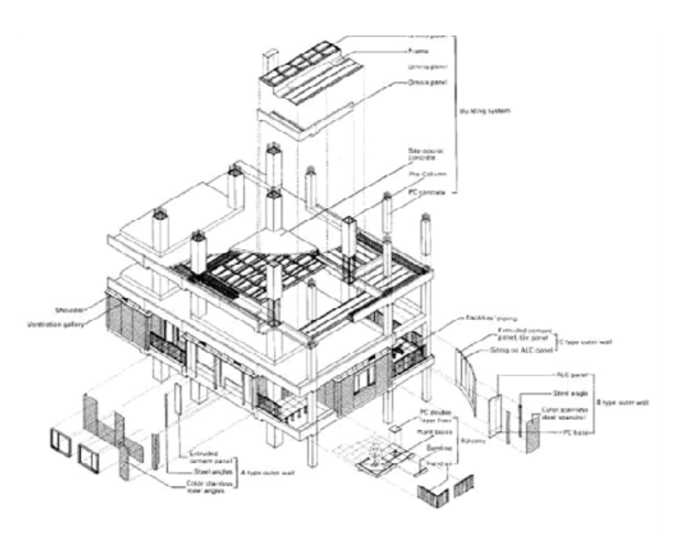








Fig. 9. NEXT 21. Edificio experimental de viviendas en Osaka, Japón. Fuente [13] [14]

Nos interesa destacar tres aspectos metodológicos de OB que se han desarrollado en NEXT21: la adaptabilidad al usuario; la diversidad constructiva mediante la incorporación de sistemas de construcción industrializada; y la claridad de relaciones entre las partes del edificio, para facilitar los cambios y la reutilización. En cuanto a la sostenibilidad material, las decisiones técnicas del proyecto se han tomado con el fin de incorporar el ciclo de vida de los materiales.

El edificio tiene en cuenta las diferentes necesidades y su evolución temporal, en una concepción integrada de la variedad ocupacional y los elementos de construcción necesarios. Se estructura en dos partes o capas: el soporte y el relleno. Estos elementos se diferencian principalmente por la durabilidad de cada uno. Así pues, en el primer grupo tenemos los elementos comunes de larga duración, que soportan el edificio (pilares, vigas y forjados); y en el segundo, los elementos de vida más corta de las áreas privadas (particiones y servicios), que pueden cambiar sin alterar la integridad del edificio.

Las relaciones técnicas entre la estructura de soporte, muros de fachada, particiones, servicios y sistemas de acondicionamiento ambiental se determinan mediante reglas claras, determinando un sistema integrado para el edificio. Los componentes de la pared se disponen según un sistema modular sobre una malla predeterminada. Los servicios forman una capa de construcción separada. Estas relaciones permiten al primer usuario caracterizar la vivienda según sus necesidades, y a los futuros usuarios, el mismo nivel de decisión.

7. Conclusiones

La relación entre industrialización de la construcción y las demandas de sostenibilidad ambiental tiene detractores y quienes lo avalan. Los primeros tienen una concepción de la evolución técnica y ambiental enfrentada a los segundos; estos fomentan la relación como la vía más racional de evolución la tecnología contemporánea.

Para avanzar en el conocimiento más riguroso del tema es necesario explotar el vínculo a través del cual se produce la relación. Este vínculo es la mejora de la gestión de los recursos materiales consumidos y la disminución de los residuos producidos; en definitiva, perseguir el cierre del ciclo de vida de los materiales. En éste ámbito hemos probado que la industrialización de la construcción es una alternativa que puede alcanzar altos grados de eficiencia.

• *Fuentes de conocimiento*

Finalmente haremos una mención de cuáles son las fuentes generales de conocimiento que nos permiten avanzar en la creación de un conocimiento específico relacionado con el *proyectar para desconstruir*. Esas fuentes tienen origen en las técnicas de producción industrial y en la propia tecnología de la arquitectura. Nos referimos a:

1. La tecnología de la construcción industrializada - también aplicada a la rehabilitación- para conocer las posibilidades de reversibilidad de los procesos constructivos.
2. La ecología industrial, que desde unos planteamientos tecnocráticos persigue modificar los parámetros fundamentales de la producción industrial.
3. La evolución de diseño industrial, cada día más preocupado por la demandas ambientales, que llegan incluso a modificar la relación clásica entre forma y función, por la de función y sostenibilidad.

Glosario

Ciclo de vida de los materiales: un material o producto recorre diferentes etapas de transformación que van desde la extracción de las materias primas hasta su eliminación final (extracción, producción, transporte, uso y disposición del residuo). Las demandas ambientales nos conducen a considerar de forma más completa el ciclo, creciendo la relevancia de la valorización de los residuos.
Construcción industrializada: forma de construcción a base de elementos producidos industrialmente de manera que están coordinados entre sí por relaciones de interdependencia, con el objetivo de alcanzar el diseño y la ejecución de un edificio o de algunos de sus sistemas constructivos. En su conjunto es el resultado de aplicar modernos métodos sistemáticos de diseño, planeamiento de la ejecución y control de la obra mediante procesos mecanizados y automatizados.
Desconstrucción: es el conjunto de acciones de desmantelamiento de una construcción que hacen posible un alto nivel de recuperación y aprovechamiento de los materiales de los residuos, para reincorporarlos nuevamente en las construcciones por medio del reciclado y la reutilización.
Ecología industrial: es el modelo de actividad productiva que adopta la industria para contribuir al desarrollo sostenible. Considera el sistema industrial como un ecosistema y toma como referencia el funcionamiento cíclico de los sistemas naturales.
Valorización de residuos: es poner en valor los componentes y materiales de los residuos de la construcción para aprovechar las materias, subproductos y substancias que contienen, mediante la separación selectiva de los residuos en origen para reciclarlos o reutilizarlos en nuevas construcciones.

Bibliografía

[1] Crowther, Philip. *Developing an inclusive model for design for deconstruction*. Florida: CIB Publication 266. Abdol R.Chini Editor. University of Florida, 2001. González Barroso, J.M., traducción de la Tabla de Crowther.
[2] Nikolic, J. Discusión sobre la Tabla de Crowther. Barcelona, 2012.
[3] Durmisevic, Elma**.** *Transformable building structures*, Delft: E.Durmisevic, 2006.
[4] González, J. M. y Mañá, F. *Manual de desconstrucció*. Barcelona: ITEC, 2000.
[5] Smith, Ryan E. *Prefab architecture*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
[6] Vezzoli, C. y Manzini, E. *Design per la sostenibilità ambientale*. Bologna: Zanichelli, 2007.
[7] Pawley, M. *Garbage Housing*. London: Architectural Press, 1975.
[8] *Detail*. Revista de Arquitectura y Detalles Constructivos. Edición española: Arquitectura + Reciclaje. 2011•1. Bilbao: Reed Business Information, 2011. ISSN 1578-5769.
[9]Asam, C. Recycling Prefabricated Concrete Components -A Contribution to Sustainable. Portugal, SB2007. *Sustainable Construction, Materials and Practices*, p. 998-1006. Lisboa. IOS Press BV, 2007. ISBN 978-1-58603-785-7.
[10] Gili, G. *Casa refugio*. Barcelona. Editorial Gustavo Gili, 1995.
[11] Staib, G., Dörrhöffer, A. y Rosenthal, M. *Components and Systems*. Basel: Edition Detail. Birkhauser, 2008.
[12] Bergdoll, B. y Christensen, P. *Home Delivery*. New York: The Museum of Modern Art, 2008.
[13] *J A: Japan Architect*. No.17. Apr. 1995. Tokio: Shinkenchiku-sha co. ltd, 1995. ISSN 0012-5377
[14] Domus: Special issue. *Norma e forma*. No. 819, Oct. 1999. Milano: Editoriale Domus, 1999. ISSN 1342-6478
[15] González Manich, C. Colaboración en la revisión del texto de: González Barroso, J.M. (2012). Industrialización y Sostenibilidad en la Tecnología de la Arquitectura. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegui, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. x - x). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la U.P.V./E.H.U.

Enfriamiento gratuito y recuperación de energía en instalaciones todo aire

Free Cooling and Energy Recovery in Building All Air Systems

Eloy Velasco Gómez [a*], Ana Tejero González [b], Manuel Andrés Chicote [c]

[a] *Dr. Ingeniero Industrial,* [b] *Dra. Ingeniero Industrial,* [c] *Ingeniero Industrial. Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid*

Resumen

El elevado coste actual de la energía y su impacto en el medio ambiente es ya, en sí mismo, un motivo suficiente para que se procure reducir el consumo energético de las instalaciones de climatización. Por otra parte, mantener en un nivel adecuado la calidad del aire interior (IAQ), requiere caudales de ventilación que penalizan energéticamente las instalaciones. Las instalaciones de climatización equipadas con enfriamiento gratuito por aire o agua, reducen el consumo energético cuando las condiciones exteriores son favorables. Los recuperadores de energía en los sistemas de climatización permiten mantener una adecuada calidad del aire interior sin penalizar energéticamente los sistemas de adecuación higrotérmica del aire impulsado a los locales, aprovechando el contenido energético de la corriente de aire expulsado para preacondicionar el aire utilizado en ventilación.

En este capítulo se describen las principales características de los sistemas de recuperación de energía y free cooling, los criterios de dimensionado y las principales aplicaciones que tienen estos dispositivos.

Palabras clave: Recuperación de Energía, Free Cooling, Eficiencia Energética, Ahorro de Energía

Abstract

Current high energy costs and the environmental impact caused by its use mean an important enough reason to seek energy consumption reduction in HVAC building systems. On the other hand, guaranteeing an adequate level of indoor air quality (IAQ) requires ventilation air volume flows which adversely affect these systems energy performance. Free cooling techniques applied within HVAC installations reduce energy consumption when the outdoor conditions are favourable. Energy recovery systems allow maintaining an appropriate indoor air quality without reducing the energy performance of air handling equipment. To this end, they take advantage of the energy content from the exhaust air flow in order to pre-condition the outside air being supplied.

In this chapter, main characteristics of energy recovery and free cooling systems, as well as dimensioning criteria and main applications are described.

Keywords: Energy Recovery, Free Cooling, Energy Efficiency, Energy saving

1. Introducción

El elevado porcentaje de energía primaria destinado al acondicionamiento higrotérmico de los edificios y la necesidad de reducir este consumo, tanto por motivos energéticos y económicos como medioambientales, hacen que el sector de la edificación sea uno de los que mejores oportunidades ofrecen para alcanzar ese objetivo. Dentro de este contexto, la recuperación de energía del aire que se expulsa al exterior permite intercambiar energía con el aire de ventilación, reduciendo la demanda de energía por este concepto.

Dado que el consumo de energía se invierte en calentar, enfriar, humidificar o deshumidificar el aire, los recuperadores que sólo permitan recuperar energía sensible (asociada a la variación de temperatura del aire para calentamiento o enfriamiento) se denominarán recuperadores sensibles, mientras que los que puedan intercambiar humedad entre las corrientes de aire expulsado y el de ventilación, se denominarán entálpicos.

* eloy@eii.uva.es

Citar como: Velasco Gómez, E., Tejero González, A., Andrés Chicote, M. (2012). Enfriamiento gratuito y recuperación de energía en instalaciones todo aire. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.) *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 266 - 294). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

Dado que estos últimos también intercambian energía sensible, a menudo se les denomina recuperadores totales.

El enfriamiento gratuito (o free cooling) se muestra como una alternativa de ahorro energético de gran potencial, ya que permite acondicionar térmicamente los locales asegurando simultáneamente la calidad del aire interior, con un mínimo consumo de energía limitado a los sistemas de circulación de fluidos [1]. Esta solución es especialmente interesante como sustitución en época estival de la recuperación de energía, sobre todo durante las horas nocturnas [2], [3] y [4].

El enfriamiento gratuito puede realizarse en su forma más simple, por aire exterior; o por agua, recurriendo a una torre de enfriamiento aprovechando las características del aire exterior cuando estas sean adecuadas para enfriar agua, que después mediante una batería permita acondicionar el aire exterior impulsado [5].

Asimismo, existe la posibilidad de optimizar la eficiencia energética del proceso, recurriendo al aprovechamiento del potencial de enfriamiento residual de la corriente de aire expulsado por requerimientos de ventilación, combinando este proceso con el planteado de enfriamiento gratuito por agua. En este caso, se alcanzarían ahorros energéticos superiores a los que se obtendrían por los dos procesos por separado [2].

En este capítulo se desarrollan las principales características asociadas a estos dos procedimientos que permiten reducir el consumo energético para el acondicionamiento de los locales, describiendo las características operativas de los diferentes sistemas de recuperación energética, analizando las principales ventajas e inconvenientes de los diferentes dispositivos y las principales aplicaciones a las que se destinan.

De la misma manera, se describirán las aplicaciones de free cooling y las características del control de la instalación, con sus ventajas e inconvenientes.

2. Recuperación de energía del aire de expulsión

El precio de la energía, la gestión de los recursos energéticos disponibles y el impacto derivado de su uso justifican las medidas encaminadas a reducir el consumo de energía, tanto en las instalaciones industriales, como en las aplicaciones no industriales, como es el caso de los edificios. Paralelamente, es necesario mantener un desarrollo sostenible, pero procurando mejorar las condiciones en las que se desarrolla la actividad humana, que en el caso de los edificios acondicionados se dirige a mantener un nivel adecuado la calidad del aire interior (IAQ), requiere caudales de ventilación que penalizan energéticamente las instalaciones.

Los recuperadores de energía en los sistemas de climatización permiten mantener una adecuada calidad del aire interior sin penalizar energéticamente los sistemas de adecuación higrotérmica del aire impulsado a los locales.

En la actual normativa se especifican las instalaciones en las que es obligatorio el uso de sistemas de recuperación de energía. En España el Reglamento de Instalaciones Térmicas en edificios (RITE) [6], establece en la "IT 1.2.4.5.2 Recuperación de calor del aire de extracción":

- En los sistemas de climatización de los edificios en los que el caudal de aire expulsado al exterior, por medios mecánicos, sea superior a 0,5 m^3/s, se recuperará la energía del aire expulsado.
- Sobre el lado del aire de extracción se instalará un aparato de enfriamiento adiabático.
- Las eficacias mínimas en calor sensible sobre el aire exterior (%) y las pérdidas de presión máximas (Pa) en función del caudal de aire exterior (m^3/s) y de las horas anuales de funcionamiento del sistema deben ser como mínimo las indicadas en la tabla 1.
- En las piscinas climatizadas, la energía térmica contenida en el aire expulsado deberá ser recuperada, con una eficacia mínima y unas pérdidas máximas de presión iguales a las indicadas en la tabla anterior para más de 6.000 horas anuales de funcionamiento, en función del caudal.
- Alternativamente al uso del aire exterior, el mantenimiento de la humedad relativa del ambiente puede lograrse por medio de una bomba de calor, dimensionada específicamente para esta función, que enfríe, deshumedezca y recaliente el mismo aire del ambiente en ciclo cerrado.

Se desarrollan a continuación los conceptos asociados a la recuperación de energía, los tipos de recuperadores y su clasificación, los criterios de diseño y un ejemplo de cálculo.

Tabla 1
Características establecidas por el RITE para la recuperación de energía, en cuanto a eficacia (%) y máxima pérdida de carga (Pa) en función del caudal de aire y el número de horas anuales de operación que deben tener los sistemas de recuperación de energía en instalaciones de climatización

Horas anuales de funcionamiento	Caudal de aire exterior (m^3/s)									
	> 0,5... 1,5		> 1,5... 3,0		> 3,0... 6,0		> 6,0... 12		> 12	
	%	Pa	%	Pa	%	Pa	%	Pa	%	Pa
≤ 2000	40	100	44	120	47	140	55	160	60	180
2000 a 4000	44	140	47	160	52	180	58	200	64	220
4000 a 6000	47	160	50	180	55	200	64	220	70	240
> 6000	50	180	55	200	60	220	70	240	75	260

2.1. Introducción y conceptos de la recuperación de energía

Se entiende por recuperador de energía a aquel dispositivo que permite la reutilización del calor residual de un sistema y cuyo objetivo final es alcanzar la eficiencia máxima de la instalación.

En general los equipos de recuperación del calor residual son intercambiadores térmicos más o menos complejos, donde pueden intervenir flujos de calor y masa, y como tales pueden ser dimensionados.

Se debe tener presente que toda recuperación de calor ha de constituir un sistema integrado dentro de un proceso, de modo que se reduzca el consumo de energía con un costo global aceptable. Como consecuencia, la recuperación del calor sólo podrá considerarse efectiva como parte integrante de un esquema bien concebido para una determinada aplicación y cuidadosamente diseñado para lograr los objetivos perseguidos con su instalación.

Las reglas del diseñador de instalaciones térmicas se pueden resumir en las tres siguientes:

- Antes de diseñar un sistema de recuperación de calor debe previamente analizarse si es posible evitar consumir previamente la energía que se va a recuperar.
- Al estudiar un sistema de recuperación de calor debe valorarse económicamente el ahorro producido y contrastarlo con el costo de la inversión que puede requerir.
- Estudiar los puntos donde se puede recuperar y los puntos de consumo; esto permitirá diseñar el conjunto de la instalación junto con el recuperador.

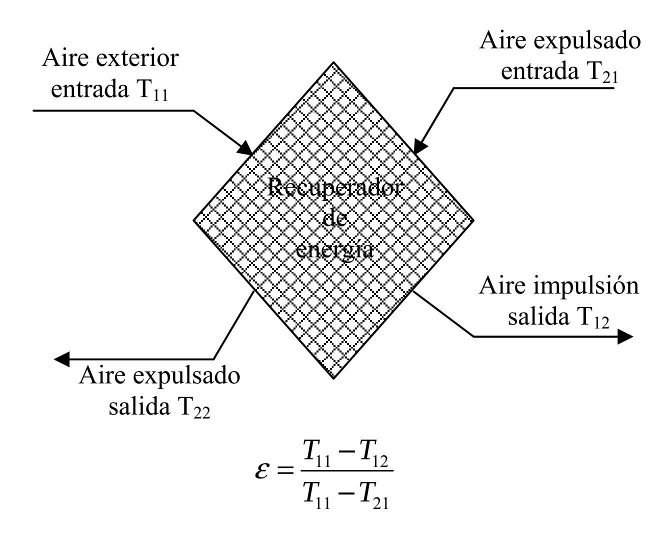
La recuperación de calor más importante en climatización consiste en la reutilización más adecuada de un calor residual del propio proceso, siendo hoy en día un medio ya acreditado para reducir el consumo y los costes energéticos. La ecuación que permite calcular la energía recuperada con un recuperador de calor nos determina las condiciones donde el sistema será más eficaz:

$$E = \rho \cdot Cp \cdot \dot{V} \cdot \Delta T \cdot t$$

A la vista de la ecuación, dado que la densidad (ρ) y el calor específico (Cp) son propiedades del aire, los recuperadores de calor del aire de extracción en edificios encuentran las condiciones de aplicación más favorables cuando el calor recuperado es elevado, esto es, si se verifican una o más de las condiciones siguientes:

- Cuando los caudales de aire exterior de ventilación y de extracción sean elevados. Por ejemplo, instalaciones donde sea necesario todo aire exterior ($\dot{V}$ elevado).
- El número de horas de funcionamiento de la instalación de ventilación es elevado (t alto).
- Cuando la estación de verano está caracterizada por un elevado número de horas con temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo relativamente elevadas y la estación invernal por un elevado número de grados-días (equivalente a ΔT alto).

La eficacia (a veces denominada eficiencia) de los recuperadores puede referirse al calor sensible, latente o total. En el esquema de la figura 1 se recoge el concepto de eficacia sensible definida como la relación entre el salto térmico del aire exterior (ventilación) al atravesar el recuperador con respecto al máximo que podría tener, definido por la diferencia de temperaturas de las corrientes que intercambian energía a la entrada del recuperador.



$$\varepsilon = \frac{T_{11} - T_{12}}{T_{11} - T_{21}}$$

Fig. 1. Esquema del proceso de recuperación de energía en un sistema de climatización por aire.

El empleo de recuperadores de calor en instalaciones de climatización permite utilizar el calor sensible y latente residual del propio proceso, consiguiendo reducir la central energética (costes de inversión en los equipos de generación) y reducir el consumo de energía de funcionamiento (costes de explotación). Como inconveniente habrá que adquirir el sistema de recuperación y habrá una pérdida de carga adicional en los flujos de aire que obligará a aumentar el consumo si se mantienen los caudales de circulación de aire.

2.2. Clasificación y tipos de recuperadores

No es fácil hacer una clasificación de los recuperadores de calor, pues en esta denominación se incluyen, modos de operación, concepción del sistema, nuevas tecnologías, aparatos, etc. La clasificación de los recuperadores de calor puede hacerse por subgrupos [7] atendiendo a los medios que transfieren energía, la separación de los fluidos, el tipo de calor recuperado, el contenido de humedad de las corrientes de aire o el elemento de intercambio empleado.

En este apartado no se considerará como sistema de recuperación de energía el intercambio entre zonas con diferente demanda, mediante bomba de calor agua-agua dimensionada para dar la máxima carga de frío (normalmente en las zonas internas) y aprovechar el calor

del condensador para calefactar los locales que precisan calor (zonas perimetrales en invierno). Tampoco se abordan los sistemas de caudal de refrigerante variable a tres tubos, denominados en configuración recuperativa, donde las unidades interiores, pertenecientes a la misma unidad exterior, pueden estar operando en modos diferentes de calefacción o refrigeración.

En el siguiente esquema de la figura 2 se presentan los principales tipos, atendiendo al elemento de intercambio empleado, utilizados en las instalaciones de climatización por aire, para recuperar la energía del aire de expulsión.

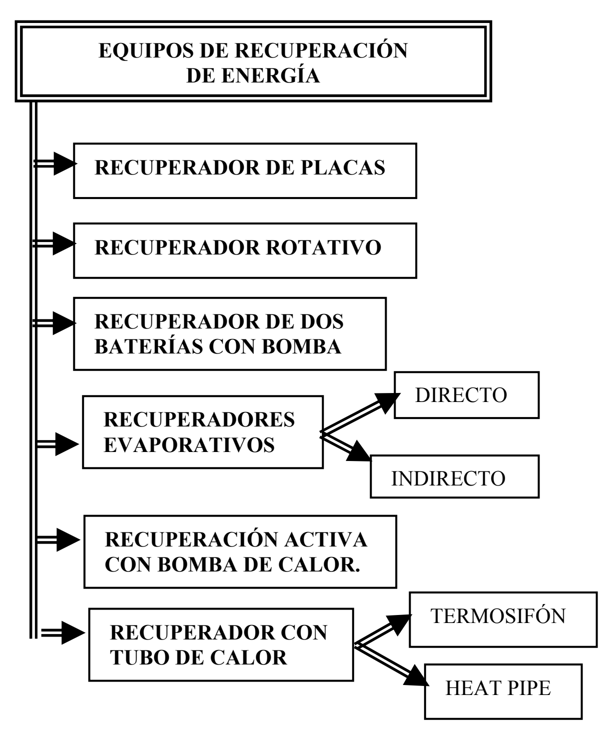


Fig. 2. Recuperadores de energía más habituales.

Todos los equipos indicados permiten intercambiar energía entre las corrientes de aire exterior utilizado para ventilación y de expulsión; pero igualmente todos van a introducir una pérdida de carga adicional, que provocará un aumento en el consumo energético de los ventiladores para mantener los mismos caudales en circulación en la instalación, a si no se hubiera dispuesto de un sistema de recuperación de energía.

A continuación se realiza una descripción de los principales equipos utilizados como sistemas de recuperación de energía en edificios donde la climatización se realiza por aire.

2.2.1. Intercambiador de placas

Son intercambiadores estáticos constituidos por una carcasa de forma rectangular abierta por los extremos, cuya sección transversal se subdivide en múltiples pasos que forman el conjunto de placas, construidas con diferentes materiales como plástico, cartón, papel o metal.

Cada dos placas adyacentes forman un pequeño conducto para el aire de extracción o el de impulsión (exterior o ventilación). La distancia entre placas varía según los requerimientos de tamaño y eficiencia. El aire de impulsión pasa a través de un lado de la placa y el de extracción a través del otro, efectuándose el intercambio de energía entre los flujos. Además, pueden disponer de aletas que aumenten el intercambio entre las corrientes.

Un número superior de placas, aunque aumenta la superficie de fricción con los fluidos en circulación, proporciona mayor sección de paso con la consecuente reducción de velocidad. El efecto global es que, al aumentar el número de placas de que dispone el recuperador, aumenta el diámetro hidráulico equivalente y disminuye la pérdida de carga que experimentan los fluidos a su paso por el recuperador. En la figura 3 se muestra un esquema de operación de estos dispositivos.

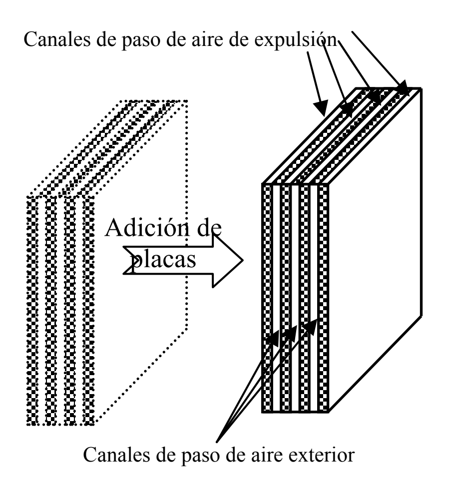


Fig. 3. Estructura de un intercambiador de placas.

Dado que:

$$\dot{V} = S \cdot v$$

Un aumento del número de placas amplía el número de canales y la sección de paso S, y para un mismo caudal $\dot{V}$ se reduce la velocidad v.

De acuerdo con los métodos de clasificación adoptados podríamos definir estos recuperadores como sistemas aire/aire, que permiten recuperar, según el material con el que estén fabricados energía sensible o total.

Existe una gran variedad de materiales que pueden ser utilizados para la confección de las placas. En aplicaciones de climatización para recuperación de calor sensible el material más habitual es el aluminio. Dependiendo de la temperatura y del tipo de aplicación pueden utilizarse también los siguientes materiales: PVC, PP (polipropileno), acero inoxidable AISI 316L y papel o cartón tratado.

La selección del material obedece al tipo de aplicación y temperatura de utilización. Por ejemplo, cuando el recuperador es de papel o cartón, como el que se muestra

en la figura 4, hay que poner especial cuidado en no operar en condiciones donde pueda aparecer condensación de humedad, lo que deterioraría el material de fabricación. Por ello estos sistemas disponen de sensores de temperatura y humedad que permiten precalentar la corriente fría con resistencias eléctricas si existe peligro de que la corriente con mayor humedad específica, normalmente la de aire de expulsión procedente del local, pueda bajar su temperatura por debajo de la temperatura de rocío. El consumo eléctrico de los equipos suele ser pequeño, pero hay que tener en cuenta la potencia consumida por las resistencias eléctricas para el térmico de potencia contratada, así como los diámetros de cableado para la acometida eléctrica.



Fig. 4. Efecto de cartón de un recuperador de placas de cartón.

El papel (o cartón), de lo que están construidos los efectos en este tipo de recuperadores, son permeables al paso de vapor de agua, por lo que flujos de aire atravesando el recuperador con diferencias en las presiones de vapor, intercambiarán vapor de agua. Este intercambio debe producirse sin condensación del vapor para evitar el deterioro del efecto utilizado en la recuperación.

En un recuperador de placas, cuado se utiliza para recuperar calor sensible, se varía la temperatura manteniendo la humedad específica constante. En condiciones particulares de funcionamiento, estos equipos, diseñados para recuperar sólo calor sensible, permiten también la recuperación del calor latente cuando la temperatura de uno de los flujos disminuye por debajo del punto de rocío y se produce condensación, lo que conlleva una mejora sustancial del rendimiento ya que aprovecha el calor latente del cambio de fase. En estas circunstancias habrá que disponer una bandeja de recogida de condensados, y mantener el sistema en condiciones adecuadas de limpieza.

En la figura 5 se muestra la disposición de un intercambiador de placas con flujos cruzados, construido en aluminio, con el sellado entre placas para evitar la mezcla entre las corrientes de aire que permite la recuperación de calor sensible entre corrientes de aire.

En casos específicos de recuperación de energía como piscinas climatizadas, cocinas, etc., donde la recuperación de calor se realiza a partir de aire con un elevado contenido de vapor de agua, aprovechar el calor de la condensación puede reducir hasta un tercio el caudal de aire de extracción para obtener un mismo incremento de temperatura del aire de renovación. En estos casos los materiales deben soportar los efectos del agua de condensación, como corrosión, deterioro del material, etc.



Fig. 5. Recuperador de placas de aluminio.

La regulación de estos equipos se limita a instalaciones donde se pueda adaptar una sección de by-pass con compuerta de regulación combinada, que permita el paso del aire de extracción a través de las placas o con el by-pass obteniéndose un control de la recuperación.

En climas muy fríos el aire de extracción puede condensar y llegar a formar hielo dentro del recuperador. Un aumento de la presión diferencial en la corriente del aire de extracción puede indicar que se está formando hielo y activar el by-pass durante un período corto de tiempo, evitando así este peligro.

Como ventajas de este tipo de recuperadores puede indicarse que, en general, se obtienen grandes superficies de intercambio en espacios reducidos y una eficacia adecuada en función de su precio (entre el 45 y 65 %). Respecto a la contaminación del aire de renovación por la corriente de extracción, presenta ventajas notables puesto que no permiten el contacto directo entre las corrientes de aire de extracción e impulsión y muchas casas comerciales suministran certificados de estanqueidad de acuerdo con el

tipo de sellado utilizado, normalmente mecánico o con resinas. No obstante, hay que asegurar que las tomas de aire limpio y las zonas de expulsión del aire viciado se encuentran dispuestas de manera que no se permita la recirculación del aire.

Adicionalmente, sobre todo con los recuperadores de cartón, la ruptura de las placas hace que se puedan mezclar las dos corrientes de expulsión y ventilación, por lo que en algunas instalaciones, como el caso de algunas zonas de instalaciones hospitalarias, no se recomienda su uso por el riesgo de contaminación del aire de ventilación que presentan.

En estos sistemas siempre habrá que tener la precaución de colocar filtros en las corrientes de aire, tanto la del aire exterior como la que procede del local (expulsión), con el fin de evitar el ensuciamiento de las placas del intercambiador, que actuaría como aislante térmico aportando una resistencia adicional a la transferencia de calor entre las corrientes.

Una de las configuraciones habituales para aumentar la superficie de intercambio, es poner los sistemas de recuperación en serie según se muestra en la figura 6. Esta configuración aumenta la pérdida de carga respecto a la situación de haber puesto en paralelo los dos recuperadores, pero permite mantener una velocidad suficientemente alta en las corrientes de aire, evitando que se deposite suciedad y además, por las variables geométricas que intervienen en esta configuración, habitualmente precisan de menos espacio.

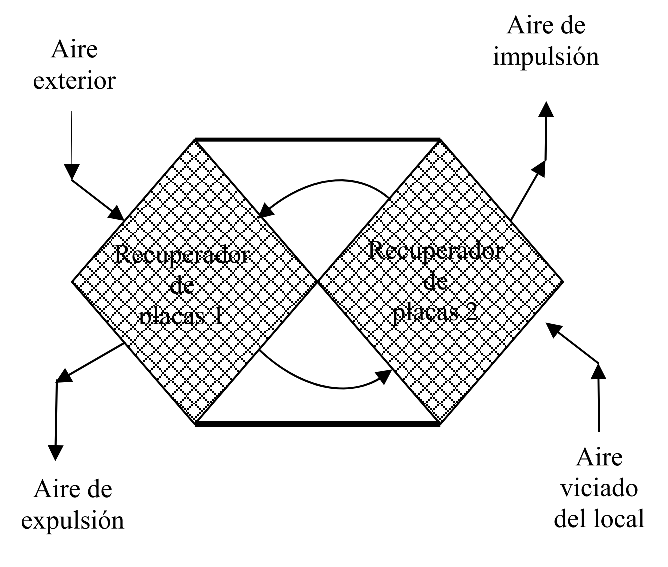


Fig. 6. Disposición en serie de dos intercambiadores de placas.

2.2.2. Recuperador rotativo

Están formados por una carcasa que contiene una rueda o tambor que gira construida con un material permeable al aire y caracterizado por una gran superficie de contacto resistente a la abrasión. Dos sectores separan el flujo de aire exterior del flujo de aire de expulsión (adyacente y en contracorriente). Al girar la rueda o tambor, el material de construcción, es atravesado alternativamente por las dos corrientes de aire, con un período que queda definido en función de la velocidad de rotación. En la figura 7 se presentan la fotografía de un recuperador rotativo de calor sensible con alguno de los elementos que lo componen.

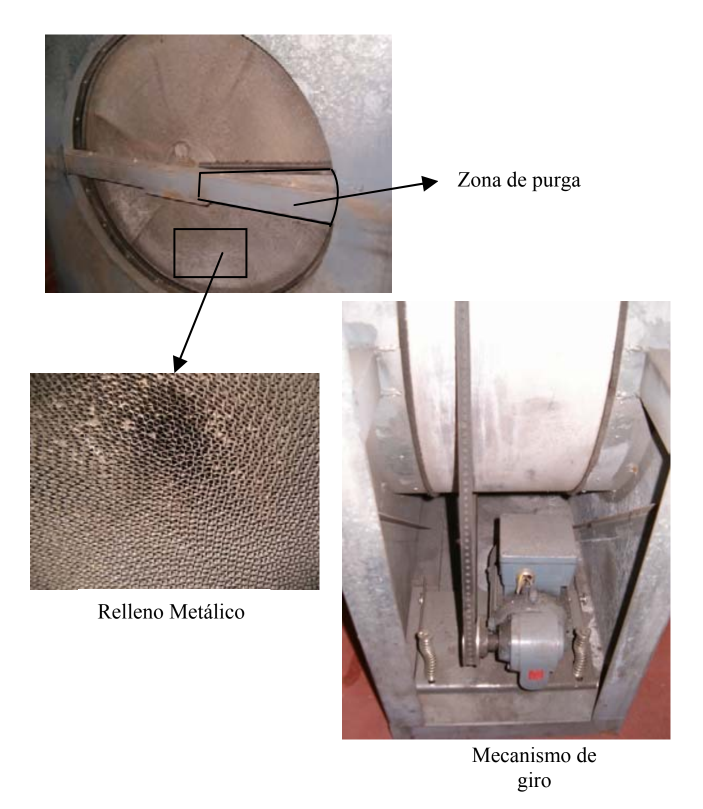


Fig. 7. Recuperador rotativo y elementos.

Puede observarse que durante la rotación el tambor absorbe calor de la corriente de aire más caliente, calentando el material de relleno, y lo cede sucesivamente a la corriente de aire más frío, enfriándose. El calentamiento y enfriamiento sucesivo permite transportar energía sensible entre las dos corrientes de aire que circulan a través del recuperador.

Estos recuperadores se definen como regenerativos, dado que las dos corrientes de aire circulan por el mismo espacio físico, que en este caso son los caminos de la estructura sólida del recuperador rotativo.

Los recuperadores rotativos pueden no obstante intercambiar calor sensible (según se ha explicado anteriormente) o calor sensible y latente (recuperador entálpico o de energía total) según sean las características higroscópicas del rotor.

Un recuperador rotativo de rotor no higroscópico recupera sólo calor sensible y, si en invierno el aire de extracción alcanza la temperatura de rocío, habrá también una cierta recuperación de energía asociada a la condensación de humedad. Su construcción se basa en colocar en el rotor una masa acumuladora (relleno metálico) que no tiene ningún tipo de tratamiento superficial que le permita captar y ceder alternativamente

humedad. Trabajan de forma similar a los recuperadores estáticos de placas, en verano e invierno, si no se alcanza la curva de saturación. Si hay transferencia de humedad en invierno, ésta se transfiere por la condensación de la humedad contenida en el aire de extracción y posterior evaporación de ésta en el aire exterior seco.

Un recuperador rotativo de rotor higroscópico recupera calor sensible más calor latente, es decir, varía la temperatura y humedad del aire, basándose en la capacidad de una sal higroscópica de captar y ceder la humedad del aire cuando varía la temperatura de éste. El rotor, construido de forma idéntica al de un recuperador rotativo sólo de energía sensible, está tratado con un material higroscópico que toma vapor de agua de la corriente de aire más húmeda y lo cede a la corriente más seca. Cuando el aire de extracción de un local acondicionado pasa a través de un tambor tratado higroscópicamente actúa de regenerador del material, pudiendo ser el aire de renovación enfriado y deshumidificado en verano o calentado y humidificado en invierno.

La transferencia de calor sensible está determinada por la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco de los dos flujos de aire, mientras la transferencia de calor latente (humedad) está determinada por los gradientes de las presiones de vapor entre la superficie tratada y las corrientes de aire entre las que se intercambia humedad.

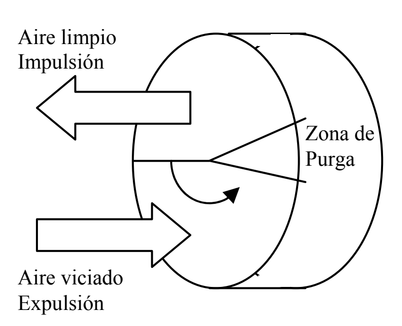
Los materiales utilizados en la construcción de este tipo de recuperadores pueden ser metales (como por ejemplo capas alternativas de aluminio corrugado y aluminio plano), que son los materiales más comunes por su elevada densidad y calor específico, pero también se utilizan fibras inorgánicas o polímeros sintéticos y orgánicos, cuando se tratan las superficies higroscópicamente para intercambiar humedad. Las secciones de paso del aire pueden tener disposiciones irregulares o estar orientadas en el sentido del flujo. Para obtener el máximo rendimiento en los recuperadores rotativos es necesario que:

- El aire de renovación y el de extracción se muevan en contracorriente.
- La instalación posea dispositivos adecuados para drenar agua o hielo que pueda acumularse por condensación.
- Se utilicen ventiladores a velocidad variable.
- En verano, el aire descargado por el recuperador tiene todavía una temperatura de bulbo húmedo relativamente baja, y puede ser empleado para alimentar una torre o un condensador por evaporación.

Un aspecto a considerar en estos equipos es la contaminación de la corriente de aire de impulsión con la de extracción, donde puede alcanzarse hasta un 1 ó 2 % de mezcla. Para reducir este riesgo se dispone en el diseño de una sección de purga, según se muestra en la figura 8, pasando parte del aire exterior al de expulsión eliminando el fluido retenido, y manteniendo los conductos del aire exterior a mayor presión que los de retorno.

Los recuperadores rotativos pueden ser de revoluciones constantes o variables, utilizando como variables de control la temperatura, la humedad y la entalpía, para evitar congelaciones, controlar energía recuperada, etc.

Como ventajas principales de estos recuperadores pueden señalarse su alta eficiencia y las posibilidades de regulación efectiva de acuerdo a las condiciones de operación. Como inconvenientes aparece el problema de la contaminación si no hay zona de purga, o si la hay su reducción de eficacia, la necesidad de que los conductos de extracción e impulsión coincidan en el espacio del recuperador, lo que puede ocasionar problemas en la ejecución de la instalación, y las posibles obstrucciones de la masa acumuladora.



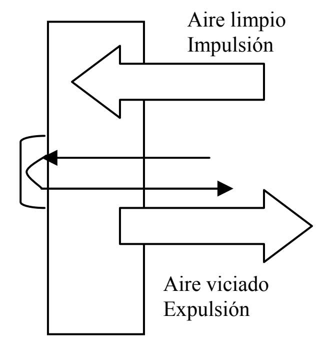


Fig. 8. Funcionamiento de la purga en un recuperador rotativo.

2.2.3. Recuperador de dos baterías con bomba

Estas instalaciones, también llamadas run-around, están constituidas por dos baterías aleteadas unidas entre sí mediante un circuito de transferencia de la energía térmica recuperada. Una bomba hace circular el líquido portador de calor (normalmente agua o una solución acuosa de etilenglicol cuando hay peligro de congelación) entre las dos baterías.

El calor es absorbido del flujo de aire con temperatura más elevada y cedido al flujo de aire con temperatura más baja. Durante el invierno, el calor será cedido del aire de extracción al aire de renovación (ventilación), mientras que durante el verano, el calor será cedido del aire de renovación al aire de expulsión.

Un esquema de operación se presenta en la figura 9.

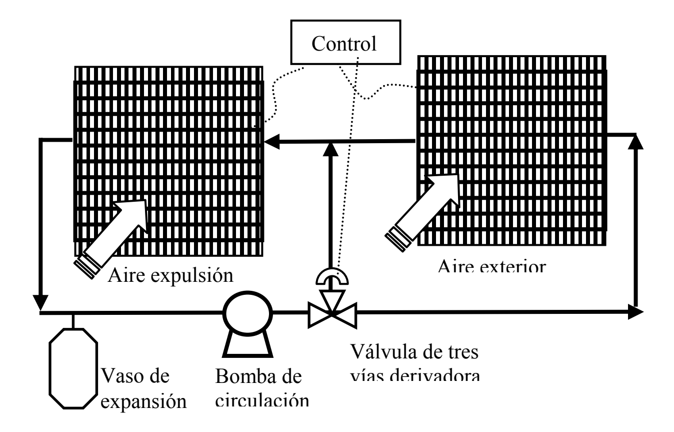


Fig. 9. Funcionamiento del sistema de dos baterías con bomba.

Las baterías están formadas por un conjunto de tubos de cobre con aletas normalmente de lámina de aluminio al ser menor su coste, o aletas de cobre en el caso de ambientes salinos para evitar la corrosión por par galvánico. No se precisan otras especificaciones para el resto de los componentes. Este sistema se adopta generalmente para recuperar sólo el calor sensible, por lo que se aplican las mismas consideraciones ya hechas para los intercambiadores de placas, con respecto a la posibilidad de condensación que provocan caídas de presión elevadas, corrosión y congelación.

Para evitar problemas como el de la congelación durante la temporada invernal se dispone de la válvula de 3 vías con lo que se garantiza un caudal suficiente de líquido de manera que la temperatura del mismo a la entrada de la batería de enfriamiento, permanezca suficientemente elevada y pueda evitar la congelación del agua condensada en la corriente de aire de expulsión. De forma similar permite controlar la temperatura del aire de renovación en un límite prefijado.

Como en todas las instalaciones en circuito cerrado, dado que se modifica la temperatura, se provocan variaciones en la densidad del líquido que se encuentra en circulación por lo que es necesario poner el correspondiente vaso de expansión que absorba las variaciones de volumen que experimenta el fluido caloportador.

La instalación de recuperación de calor de dos baterías es muy flexible, puesto que puede ser utilizada también si las tomas de aire exterior y de extracción están distantes entre sí, o cuando existen varias tomas de aire exterior y/o de extracción, uniéndolas por parejas con circuitos cerrados.

Como inconvenientes principales debe señalarse su reducción de la eficiencia por el doble intercambio térmico aire-líquido-aire, aunque esta eficiencia dependerá de lo efectivas que sean las baterías compactas de tubos aleteados y el consumo de las bombas de circulación que para evitar que sea elevado, la distribución en las baterías debe proporcionar pérdidas de carga por el paso de líquido pequeñas. Además, hay peligro de oxidación y/o corrosión, por lo que se recomienda la utilización de soluciones con inhibidores y el control periódico del PH del fluido caloportador que circula entre las baterías.

2.2.4. Recuperador evaporativo

El enfriamiento evaporativo consiste en retirar energía sensible del aire aprovechando su capacidad de evaporar agua cuando la humedad del aire es baja.

El proceso ideal es adiabático, ya que convierte el calor retirado del aire (cede calor sensible), causa por la que desciende su temperatura, en una ganancia de humedad (gana calor latente). En un diagrama psicrométrico como el presentado en la figura 10 se puede observar siguiendo la correspondiente línea de entalpía constante, la máxima capacidad de enfriamiento adiabático del aire que es la denominada temperatura de saturación adiabática.

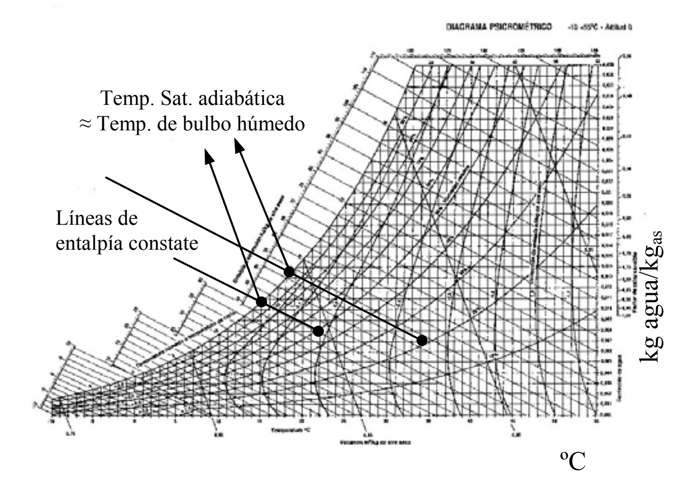


Fig. 10. Evolución psicromérica del enfriamiento adiabático del aire.

De manera similar a la que se enfría el aire, se puede enfriar el agua no evaporada en contacto con el aire, pudiendo teóricamente ser también enfriada hasta la temperatura de saturación adiabática del aire utilizado para su enfriamiento.

La evolución del aire en el proceso es hacia arriba (incrementa su humedad) y hacia valores menores de temperatura respecto al punto de entrada del aire, siguiendo la línea de entalpía constante. Si el aire alcanza el punto de saturación, correspondiente al 100 % de humedad relativa, se conseguiría el máximo salto de enfriamiento del aire.

En la figura anterior se presentan las líneas de saturación, muestran que para una temperatura elevada (34ºC) y baja humedad (20 %) el grado de enfriamiento teórico que se conseguiría en un proceso de saturación adiabática ideal sería de 18,5 ºC. También se representan unas condiciones habituales del aire interior de los locales (T = 22 ºC y HR 50 %), donde el aire y/o el agua podrían enfriarse hasta 15ºC, consiguiendo en esta situación valores de referencia para el enfriamiento inferiores a los que normalmente proporcionaría utilizar aire exterior.

En cualquier caso la capacidad de refrigeración depende de las condiciones psicrométricas del aire utilizado en el proceso de enfriamiento evaporativo, que para el caso de configuración recuperativa serán las del aire expulsado, con unas condiciones similares a las que hay en el local.

El incremento de la capacidad de enfriamiento es la razón por la que, en el apartado 2 de la IT 1.2.4.5.2 Recuperación de calor del aire de extracción, aparece el texto: “sobre el lado del aire de extracción se instalará un aparato de enfriamiento adiabático”.

Por tanto, los sistemas de enfriamiento evaporativo pueden considerarse recuperadores de energía siempre que utilicen el aire procedente de los locales climatizados como aire secundario para el proceso de enfriamiento evaporativo, aprovechando su menor temperatura y humedad.

El sistema habitual utilizado como recuperador evaporativo combina un intercambiador de calor y un saturador adiabático, según se muestra en la figura 11. El aire exterior circula por la zona seca del intercambiador (zona del aire primario). Para realizar el proceso de enfriamiento con el agua (secundario) se utiliza el aire viciado procedente del local antes de ser expulsado. El intercambiador convencional utilizado en este tipo de procesos es del tipo de placas, construido en material que pueda soportar el contacto con el agua, como es el plástico o metal.

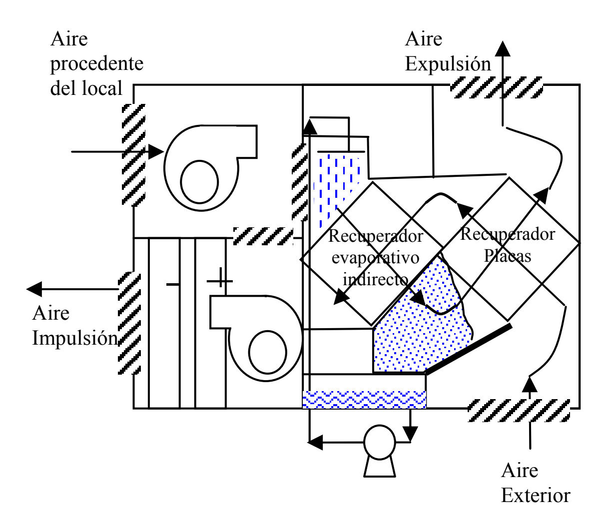


Fig. 11. Esquena de operación de un recuperador evaporativo.

El sistema puede recuperar energía tanto en condiciones de invierno como de verano. En invierno el sistema no utiliza la capacidad de enfriamiento del agua, dado que el objeto de la recuperación de energía será calentar el aire procedente del exterior, y en el caso de que hubiera demanda de frío, en condiciones de invierno es más rentable y efectivo operar utilizando un sistema de free cooling por aire, dado que el aire del exterior tendrá una temperatura más baja que la del local que se pretende acondicionar.

A menudo, en la corriente de expulsión del aire procedente del recuperador, se coloca la unidad condensadora del sistema de enfriamiento, aprovechando que posee una temperatura inferior a la del aire exterior, reduciendo por tanto la temperatura de condensación, mejorando el rendimiento del proceso y minimizando la posibilidad de emisión de aerosoles.

2.2.5. Recuperador con tubo de calor

Los tubos de calor, conocidos habitualmente como heat pipes, están constituidos esencialmente por un tubo metálico sellado, en el que se ha hecho el vacío y "cargado" el fluido de trabajo, que cambiará de fase, captando calor del aire en contacto con el evaporador y cediéndolo al aire en contacto con el condensador. El esquema del proceso se muestra en la figura 12.

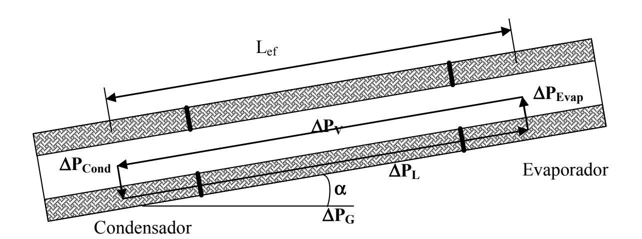


Fig. 12. Esquena de operación de un tubo de calor.

La batería contiene un determinado número de estos dispositivos los cuales se dividen en dos secciones que actúan como evaporador o condensador dependiendo de la temperatura del aire que recorre cada zona, siendo el evaporador la de mayor temperatura, donde toma calor del ambiente, y el condensador la de menor, cediendo calor al ambiente. Para reducir las resistencias térmicas asociadas a las transferencias de calor entre el tubo y el aire, estas superficies se encuentran habitualmente aleteadas, aumentando la superficie de intercambio.

Los materiales de construcción empleados deben ser aptos para las condiciones de trabajo que estén previstas. En el campo del aire acondicionado es normal utilizar bastidores de acero galvanizado, tubos de cobre, rellenos de metal sinterizado (por ejemplo cobre poroso) y aletas de aluminio o cobre. Existen dos tipos de dispositivos dependiendo de cual sea la fuerza que obliga a retornar el fluido desde el condensador al evaporador, los denominados termosifones y los dispositivos heat pipe.

Los recuperadores por termosifón siempre están colocados en posición vertical, para que el retorno del líquido se produzca por la fuerza de la gravedad, obligando a que el evaporador se coloque en la parte más baja y el condensador en la más alta del dispositivo según se muestra en la figura 13.

Cuando se calienta el extremo inferior del tubo, el fluido de trabajo se evapora y asciende hacia el extremo opuesto, donde se pone en contacto con el aire más frío y condensa. Las gotas de líquido descienden por gravedad a la parte inferior de cada tubo, donde se vuelven a evaporar debido al aire caliente, cerrando el flujo másico en circulación y dando así continuidad al ciclo.

El retorno por gravedad obliga a que el flujo de aire más frío, que provoca la condensación del vapor del refrigerante, atraviese siempre la parte alta del recuperador y que el aire más caliente atraviese siempre la parte baja.

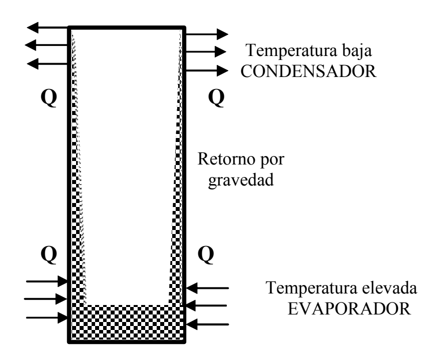


Fig. 13. Esquena de operación de un tubo de calor termosifónico.

Se necesita que la instalación esté dotada de un sistema de conductos y compuertas que permitan poder intercambiar la posición de circulación del flujo de aire exterior y el de extracción al cambio de las estaciones, de manera que el flujo de aire más frío atraviese siempre la parte superior del intercambiador para que se produzca el retorno por gravedad y el más caliente por la parte inferior para que se provoque la evaporación del fluido. En otra situación el dispositivo no puede funcionar. El inconveniente de esos dispositivos reside en los periodos de estaciones intermedias entre verano e invierno, donde es necesario cambiar las corrientes que circulan por las zonas utilizadas como condensador y evaporador, en función de las características térmicas de las corrientes de aire involucradas en el proceso de intercambio.

Entre sus ventajas se pueden citar: la ausencia de riesgos asociados a la contaminación entre los dos flujos de aire pues no hay una pared que separa las corrientes de aire, los costes de mantenimiento reducidos y la adaptabilidad a atmósferas industriales peligrosas.

Como principal inconveniente, además de los ya presentados por la geometría intrínseca del dispositivo, se destaca su elevado coste y las dificultades de fabricación e instalación. Dado que estos sistemas son sellados, deben estar sometidos a vacío antes de la carga del fluido de trabajo y eso requiere sistemas de fabricación más o menos complicados.

Los recuperadores de tipo heat pipe están constituidos al igual que los termosifones por un tubo metálico sellado en el que se ha hecho el vacío y "cargado" con un líquido de trabajo, pero a diferencia de los termosifones que trabajaban utilizando el retorno por gravedad, los tubos de calor están revestidos interiormente por un material poroso de modo que el retorno del condensado a la extremidad caliente (evaporador) del tubo se realiza por las fuerzas capilares que se desarrollan en el relleno capilar.

En la figura 14 siguiente se presentan las partes de un tubo de calor o heat-pipe. Obsérvese que con esta configuración, la evaporación del líquido en la extremidad caliente retira de la estructura porosa fluido en fase líquida que será aportado desde la zona de condensación en el extremo frío por el transporte capilar existente en la estructura; este proceso determina un continuo flujo del propio líquido de la sección de condensación a la de evaporación. El flujo del líquido no depende de la fuerza de gravedad, si bien puede ser ayudado por ella (asistido por gravedad). Cuando la gravedad se opone al transporte del líquido desde el condensador al evaporador se denomina heat pipe impedido por la gravedad.

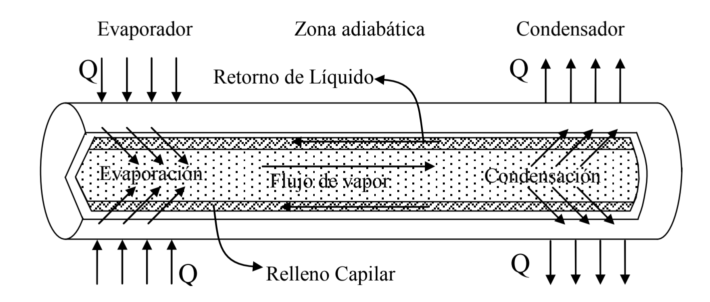


Fig. 14. Esquema de operación de un tubo de calor heat pipe.

Al colocar varios tubos de calor en una batería de tubos aleteados se tiene un intercambiador que se monta en un marco metálico con las conexiones a los conductos por los que circulan las corrientes de aire entre las que haya que intercambiar calor. Este dispositivo permite una completa reversibilidad, dado que cada uno de los dos extremos puede funcionar igual como evaporador o condensador, pudiendo hacerlo tanto en posición horizontal o con inclinación variable, pudiendo optimizar la posición que permita la máxima recuperación de energía, para un determinado clima, a lo largo de todo el año.

Los materiales de construcción empleados deben ser adecuados a las condiciones de trabajo, teniendo en cuenta las características específicas del fluido caloportador utilizado y la presencia de posibles agentes contaminantes en las corrientes de aire. En la figura 15 siguiente se presenta una batería de tubos de calor heat pipe experimental utilizada para recuperación de energía en sistemas de climatización.

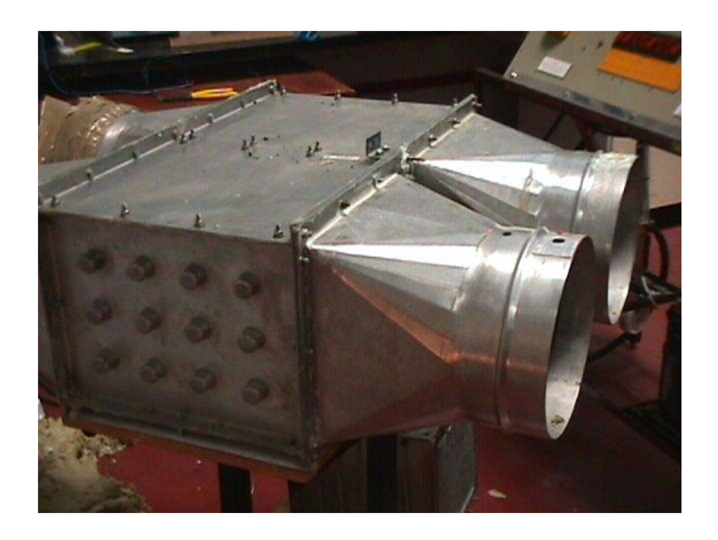


Fig. 15. Batería de heat pipe aleteados en acero inoxidable.

Los recuperadores por tubos de calor presentan algunas ventajas que conviene citar:

- Están adaptados esencialmente a la recuperación de calor sensible, aunque combinando enfriamiento evaporativo, podrían trabajar con recuperador evaporativo.
- Son indicados para recuperaciones en las cuales es imperativo que los caudales de aire primario y secundario no puedan mezclarse jamás, ni siquiera por accidente o ruptura de la estructura del recuperador. Un ejemplo de este tipo de instalaciones serían las hospitalarias, donde existen zonas con enfermos contagiosos o inmunodeprimidos, donde no puede existir riesgo de mezcla de las corrientes de aire de ventilación y las de expulsión.
- No necesitan energía eléctrica, ni hay partes móviles que originen desgastes.
- Operan como rectificador térmico eliminando las variaciones de temperatura que puedan tener las corrientes de aire a la entrada, pues al operar con calor latente de cambio fase, la masa térmica (inercia) de estos recuperadores se puede considerar muy elevada.
- Pueden ir incorporados en un climatizador o conectados directamente a los conductos de aire de extracción y retorno.

Como inconveniente principal, al igual que en los sistemas termosifónicos, aparecen las dificultades para su cálculo y el elevado coste.

2.2.6. Recuperador activo o por bomba de calor

Este sistema utiliza un ciclo frigorífico por compresión que transfiere energía de una fuente fría a una caliente, utilizando un fluido intermedio que absorbe o cede calor al recorrer un ciclo termodinámico. En el caso de que opere como recuperador de energía en sistemas del tipo aire/aire, una unidad se encuentra en el aire de extracción y la otra en el aire de ventilación (renovación).

La utilización de un sistema de bomba de calor como recuperador se basa en colocar la unidad exterior, que cede calor en verano actuando como condensador y toma calor en invierno actuando como evaporador del ciclo frigorífico, en el conducto de aire de expulsión, aprovechando el nivel térmico más adecuado de esta corriente de aire.

El máximo rendimiento teórico establecido por un ciclo de Carnot inverso, para una máquina frigorífica (operación en condiciones de verano) o como bomba de calor (aportando calor en invierno al interior de los locales acondicionados) viene definido por las siguientes ecuaciones:

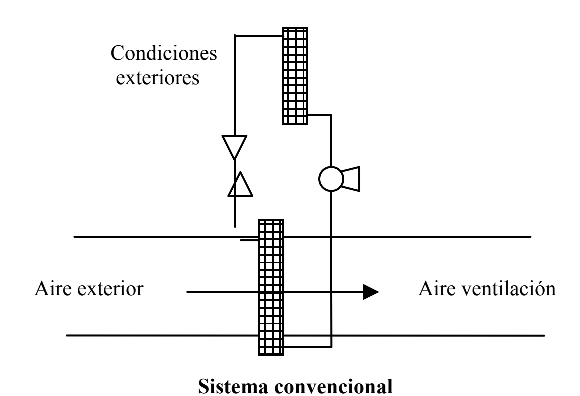
$$\eta_{MF} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad ó \quad \eta_{BC} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Siendo T_F y T_C las temperaturas en grados Kelvin de los focos frío y caliente respectivamente que están intercambiando energía.

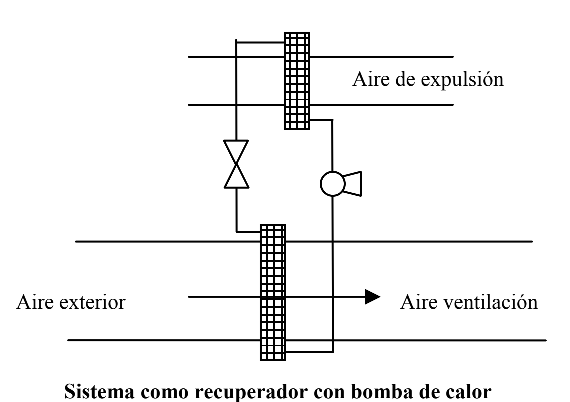
Aunque el rendimiento del ciclo de Carnot inverso es teórico y no puede alcanzarse con los sistemas reales, permite observar que cuanto menor sea la diferencia de los niveles térmicos entre los que se intercambia energía, mejor serán las prestaciones obtenidas del sistema.

En definitiva, es más fácil en invierno calentar el evaporador de una máquina frigorífica con aire de expulsión a 20ºC, que con aire exterior a -4ºC, y también es más fácil refrigerar la unidad condensadora en verano con aire de expulsión a 25ºC que con aire exterior a 35ºC. Este es el mismo principio que se utiliza para mejorar el rendimiento de las instalaciones geotérmicas que aprovechan la mayor temperatura del suelo en invierno y la menor en verano.

En la figura 16 se presenta el esquema comparativo del sistema convencional y del sistema de recuperación con bomba de calor.



Sistema convencional



Sistema como recuperador con bomba de calor

Fig. 16. Disposición de la unidad exterior de una bomba de calor.

Es evidente que el inconveniente que presenta este tipo de instalaciones, al igual que en la utilización de otros tipos de recuperadores de energía, reside en la necesidad de disponer de un conducto de aire de retorno donde colocar la unidad exterior de la bomba de calor. En muchas de las instalaciones existentes, sobre todo de tamaño reducido, el retorno no es conducido, y el aire expulsado sale por

exfiltración impidiendo la recuperación energética de esta corriente. La posible utilización del sistema vendrá condicionada por la existencia del conducto de retorno y, por tanto, por el tamaño de la instalación.

No obstante, el interés actual por estos sistemas como recuperadores de calor, surge al poder revalorizar energías residuales en procesos, o al transvasar energía de zonas calientes a zonas frías del propio edificio, como los sistemas de caudal de refrigerante variable en configuración recuperativa. Estas ventajas hacen especialmente útiles las bombas de calor al adaptarse a las fuentes de bajo nivel térmico que en cada caso estén disponibles, formando la base de los denominados sistemas integrales de recuperación de energía.

Como inconveniente principal está una inversión inicial mayor que con otros sistemas, que puede ser compensada con el ahorro energético del funcionamiento de la bomba de calor.

Algunos técnicos no consideran la recuperación de energía mediante bomba de calor, un sistema de recuperación de energía por precisar un consumo de trabajo adicional externo al sistema para la operación del compresor, pero ese mismo argumento se podría esgrimir al analizar otros sistemas de recuperación por el incremento de consumo de energía eléctrica para mantener el caudal de aire de ventilación al incrementar la pérdida de carga, para mantener el giro de los recuperadores rotativos o la circulación del fluido caloportador en el caso de los sistemas de dos baterías con bomba (run-around).

Al igual que ocurre en otros procesos energéticos, lo que determinará la bondad de los diferentes sistemas de recuperación de energía será el estudio comparativo de lo que cuesta, utilizando criterios energéticos, exergéticos, económicos o medioambientales, los diferentes modos de aprovechar la energía del aire que se expulsa al exterior para mantener una adecuada calidad del ambiente interior.

La mayoría de los sistemas de recuperación de energía, como intercambiadores que son, utiliza los mismos procedimientos que estos para su dimensionado.

Los métodos más habituales para el intercambio térmico son el DMLT y el ε-NUT, pero el principal inconveniente en los cálculos necesarios reside en la correcta evaluación de los coeficientes de convección que aparecen en el intercambio, bien para la transferencia de calor sensible como consecuencia de la diferencia de temperaturas, o del calor latente por la diferencia en las presiones de vapor de agua que provoca el intercambio de humedad. Estos coeficientes de convección de calor y masa son necesarios para evaluar el coeficiente global de intercambio entre las corrientes de aire.

Los recuperadores de calor en la práctica se seleccionan mediante procedimientos gráficos e informáticos, en función de los caudales de aire y en las pérdidas de carga y rendimiento deseado. Una vez seleccionado el equipo que cumple con los requisitos anteriores, se calculan las temperaturas y las humedades de salida del recuperador en función de las condiciones de entrada.

En situaciones reales hay que tener en cuenta las diferentes circunstancias que hay contemplar en la gran diversidad de locales con características específicas de acondicionamiento que tienen. Estas circunstancias determinan la selección de los posibles tipos de sistemas de recuperación que pueden ser utilizados.

En el siguiente apartado se destacan algunos de los criterios que deben tenerse en cuenta para una selección adecuada, donde se contemplan tanto parámetros de ahorro de energía, objetivo de los recuperadores, como aquellos relacionados con la calidad de las instalaciones construidas.

2.3. Criterios de diseño a considerar en la selección

Los principales parámetros que hay que considerar en la selección del sistema de recuperación son:

- Eficacia.
- Pérdida de presión (o de carga).
- Tipo de instalación y localización.
- Impacto ambiental.

2.3.1. Eficacia

Al estudiar las prestaciones de los sistemas recuperadores de energía del aire de expulsión se debe diferenciar entre la eficacia de los equipos intercambiadores de calor y la del sistema recuperativo en su conjunto. Las prestaciones de un recuperador de calor se expresan mediante la eficacia que será diferente en función del tipo de energía intercambiada que puede ser:

- Sensible (asociada a la temperatura de bulbo seco)
- Latente (asociada a la humedad específica)
- Total (asociada al contenido en entalpía específica)

La eficiencia de un recuperador de calor se define como:

$$\varepsilon = \frac{\textit{Cantidad de energía recuperada}}{\textit{Cantidad máxima de energía recuperable}}$$

Dado que a lo largo de la recuperación intervienen dos fluidos que es necesario identificar en todo momento, es recomendable utilizar un sistema de notación formado por dos subíndices:

- Primer subíndice, para indicar la corriente de fluido que estamos considerando, por ejemplo:
  - "1" para todas las propiedades o características correspondientes al fluido que entra por primera vez en el recuperador. (Aire exterior).
  - "2" para el fluido que entra por segunda vez en el recuperador. (Aire de retorno).

- Segundo subíndice, para indicar en qué punto del recuperador se considera la propiedad o característica utilizada, por ejemplo:
  - "1" para la entrada
  - "2" para la salida.

Utilizando la nomenclatura utilizada como ejemplo de los subíndices, se puede expresar la eficacia como:

$$\varepsilon = \frac{Q_{ren}(X_{12} - X_{11})}{Q_{min}(X_{21} - X_{11})} \quad o \quad \varepsilon = \frac{Q_{exp}(X_{22} - X_{21})}{Q_{min}(X_{11} - X_{21})}$$

donde:

- Q_{ren}: Caudal de aire de renovación, o del exterior.
- Q_{ext}: Caudal de aire de expulsión o de retorno.
- Q_{min}: Caudal de aire menor entre los de renovación y extracción.
- X: Propiedad analizada, temperatura de bulbo seco, humedad específica o entalpía.

Según establece el reglamento, la eficacia se mide sobre la corriente de aire exterior, que será la energía útil aprovechada, por lo que el caudal mínimo siempre se debe considerar el del aire exterior. Por tanto, la ecuación anterior para analizar la eficiencia establecida por el RITE [6], puede expresarse como:

$$\varepsilon = \frac{X_{12} - X_{11}}{X_{21} - X_{11}}$$

En función de la propiedad termodinámica que se utilice en la expresión anterior hablaremos de valores de eficacia sensible o de temperatura (cuando se analiza únicamente calor sensible, X = temperatura de bulbo seco), energética (en el caso de calor total, X = entalpía) o latente (X = humedad específica).

En la figura 17 se presenta la evolución del aire exterior en el diagrama psicrométrico, suponiendo recuperación de energía sensible (marcado en la figura como 2) y total (sensible y latente, marcado en la figura como 1) en la situaciones de invierno y verano.

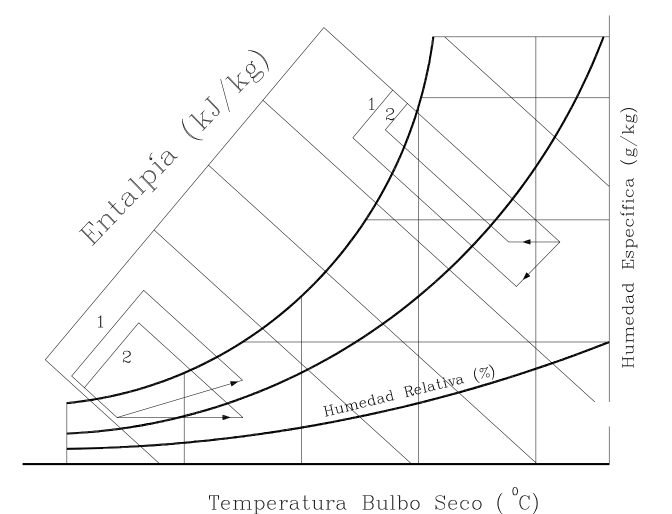


Fig. 17. Evoluciones psicrométricas de recuperación sensible y latente.

En la tabla siguiente se especifican las eficiencias obtenidas mediante diferentes sistemas de recuperación y el tipo de energía que son capaces de intercambiar.

Tabla 2
Eficiencia de diferentes recuperadores de calor de climatización

Recuperador	Energía recuperada	Eficiencia (%)
Rotativo	Sensible o Total	70-90
Placas	Sensible o Total	45-65
Run-around	Sensible	40-60
Bomba de calor	Sensible	50-70
Tubo de Calor	Sensible	50-80
Evaporativo	Sensible	50-70

2.3.2. Pérdida de presión (o de carga)

Para la evaluación del sistema recuperador en su conjunto es necesario definir un coeficiente de prestación C.O.P. equivalente a los valores del rendimiento definidos para los sistemas de bomba de calor o de recuperación activa, en donde se puedan relacionar la energía aprovechada en el sistema con la energía consumida, adicional por haber colocado el recuperador de energía.

El principal término de aporte en el consumo de energía adicional aparece con la variación de la pérdida de carga en la red de distribución del aire, lo que conlleva un aumento en el consumo de ventiladores para mantener los caudales de aire necesarios. En algunos recuperadores específicos aparecerán consumos adicionales por bombas de circulación de un fluido intermedio, el compresor de las bombas de calor o el motor para la rotación de la masa en los rotativos.

En la Tabla 3 siguiente se resumen los valores típicos [DTIE 8.01] para diferentes recuperadores, si bien estos pueden variar en función de las diferentes geometrías, criterios de construcción o velocidad de paso del aire.

Tabla 3
Pérdidas de presión en equipos recuperadores de calor

Recuperador	Pérdida de carga (Pa)	Velocidad del aire (m/(s)
Rotativo	100 - 180	2,5 - 4,0
Placas	120 - 400	1,5 - 6,0
Run-around	150 - 300	1,5 - 2,5
Tubo de Calor	100 – 500	2,0 - 4,1
Evaporativo	50 - 350	1,5 - 5,0

Para determinar el COP de un sistema, según lo indicado anteriormente, es necesario conocer la energía en forma de trabajo que consume. Además de los consumos específicos de cada sistema, será necesario evaluar el consumo adicional por la pérdida de carga introducida, pero manteniendo siempre los caudales de circulación requeridos. Los consumos de los ventiladores siempre son

proporcionales al caudal por la pérdida de carga, por lo que un incremento en ésta, también provocará un aumento en el consumo eléctrico del ventilador.

Adicionalmente, dado que los recuperadores son intercambiadores de energía, es necesario que los coeficientes de intercambio de masa y/o energía, sean lo más elevados posibles. La suciedad (por ejemplo partículas de polvo), que con el tiempo aportaría olores por su descomposición en el aire de ventilación, también puede quedarse adherida a la superficie del intercambiador. La suciedad se comportará como una resistencia adicional que tendrá que vencer el traspaso de energía entre corrientes de aire, por eso es necesario filtrar el aire antes de que circule por el recuperador, provocando un incremento adicional en la pérdida de carga y por tanto, en el consumo.

2.3.3. Instalaciones y localización

La recuperación de calor del aire en climatización necesita obligatoriamente una doble red de conductos: admisión de aire nuevo (aire exterior) y extracción del aire viciado (aire de expulsión). Independientemente del precio del recuperador empleado, la instalación de la red de extracción es una limitación a añadir al precio del sistema.

La ejecución de los conductos del aire de extracción y del aire exterior repercute en un aumento de costes que será necesario tener en cuenta para valorar objetivamente el beneficio neto que se consigue con la instalación de recuperadores. Así, por ejemplo, la gran mayoría de los equipos disponibles (rotativos, por placas, tubos de calor, etc.) necesitan para su instalación que ambos conductos sean adyacentes en un punto, lo que puede hacer más compleja la ejecución y aumentar el área ocupada por la instalación.

Otros como el de dos baterías con bomba (run-around) o la recuperación activa no precisan de este requisito al utilizar un fluido intermedio (agua, agua glicolada, refrigerante, etc.) como fluido caloportador. Estos modelos son muy flexibles en cuanto a que pueden ser adaptados también si las tomas de aire exterior y de extracción están distantes entre sí, o cuando existen más tomas de aire exterior y/o de extracción, como se muestra en el esquema de la figura 18. Se prestan, por tanto, a ser aplicadas particularmente a instalaciones de acondicionamiento de aire ya existentes o para instalaciones industriales.

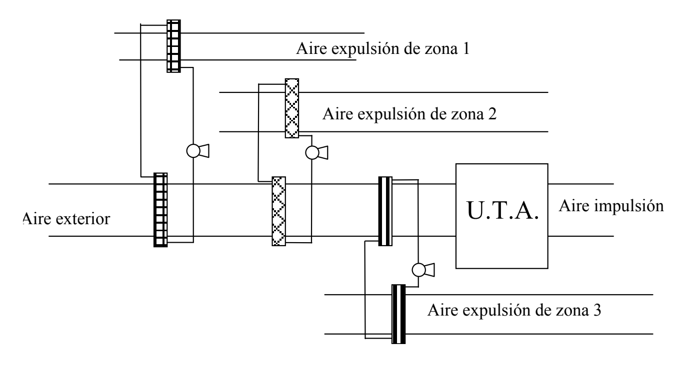


Fig. 18. Esquema de operación de instalación de dos baterías con bomba, utilizando diferentes conductos de retorno y uno de impulsión.

Es importante estructurar las instalaciones de modo que se logre la máxima flexibilidad en la operación de acuerdo con las condiciones del aire exterior. En general, siempre es recomendable incorporar un by-pass en el equipo de forma que puedan desviarse las corrientes de aire del paso por el recuperador de acuerdo con la estrategia de trabajo más adecuada, permitiendo utilizar sistemas free-cooling.

Por último, para asegurar una correcta calidad del aire suministrado debemos prestar atención a la colocación de la toma de aire exterior, de modo general no debe estar en la proximidad de chimeneas, de extractores de gases de cocinas, aseos o aparcamientos, de otros climatizadores o de torres de refrigeración. Igualmente, será oportuno instalar filtros con un rendimiento de captación adecuado y ventiladores a velocidad variable para realizar una gestión más económica de la instalación de impulsión.

2.4. Ejemplo de cálculo

Para finalizar con este apartado se presentan los resultados comparativos de la recuperación de energía utilizando sólo un recuperador de placas o aprovechando la capacidad que ofrece el enfriamiento evaporativo, según se establece en la normativa. La instalación que se presenta en la figura 19 dispone de un recuperador de placas de aluminio de 65 m^2 que puede operar como recuperador sensible o aprovechar el potencial que aporta la refrigeración evaporativa para incrementar el potencial de enfriamiento.

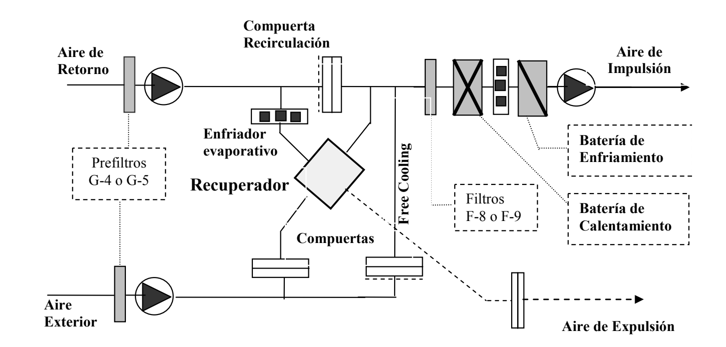


Fig. 19. Esquema de operación de la instalación.

El esquema corresponde a la instalación de un edificio comercial bien aislado y los datos de operación para régimen de invierno son:

- Sólo se utiliza el recuperador de placas.
- Las condiciones de operación del equipo son:
  - Flujos másicos de aire: 2 kg/s aire exterior y 1,9 kg/s aire de retorno.
  - Pérdida de presión: 183 Pa aire exterior y 178 Pa aire de retorno.
  - Velocidad media de paso 6,3 m/s aire exterior y 6,3 m/s aire de retorno.

Las condiciones de operación medidas en las corrientes de entrada y salida se presentan en la figura 20.

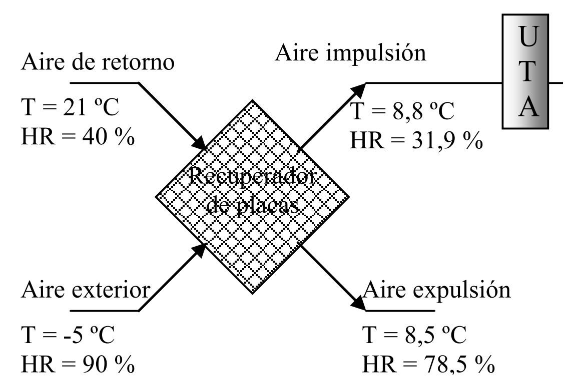


Fig. 20. Operación del recuperador de placas en ciclo de invierno, sin utilizar enfriamiento evaporativo.

Los resultados obtenidos respecto a la energía recuperada son:

- Potencia calorífica recuperada: 27,9 kW.
- Eficacia térmica (sensible): 53,2 %.
- Eficacia energética (total): 40,4 %.

Para régimen de verano se plantean dos situaciones posibles, utilizando o no el sistema de enfriamiento adiabático en la corriente de aire de expulsión antes de entrar al recuperador de placas.

• *Situación 1ª: Recuperador de placas sin enfriamiento adiabático del aire de expulsión*

Las condiciones de operación del equipo son:

- Flujos másicos de aire: 2 kg/s aire exterior y 1,9 kg/s aire de retorno.
- Pérdida de presión: 211 Pa aire exterior y 189 Pa aire de retorno.
- Velocidad media de paso 7,1 m/s aire exterior y 6,6 m/s aire de retorno.

Los resultados obtenidos se recogen en la figura 21.

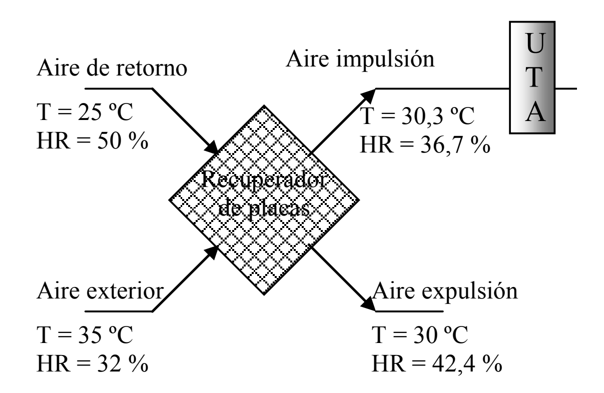


Fig. 21. Operación del recuperador de placas en ciclo de verano, sin utilizar enfriamiento evaporativo.

Los resultados obtenidos respecto a la energía recuperada son:

- Potencia calorífica recuperada: 10,3 kW.
- Eficacia térmica (sensible): 50 %.
- Eficacia energética (total): 39,3 %.

• *Situación 2ª: Recuperador de placas con enfriamiento adiabático del aire de expulsión*

Las condiciones de operación del equipo son:

- Flujos másicos de aire: 2 kg/s aire y 1,9 kg/s aire de retorno.
- Pérdida de presión: 211 Pa aire exterior y 186 Pa aire de retorno.
- Velocidad media de paso 7,1 m/s aire exterior y 6,5 m/s aire de retorno.

Los resultados obtenidos respecto a la energía recuperada son:

- Potencia calorífica recuperada: 16,9 kW.
- Eficacia térmica (sensible): 50,1 %.
- Eficacia energética (total): 65,9 %.

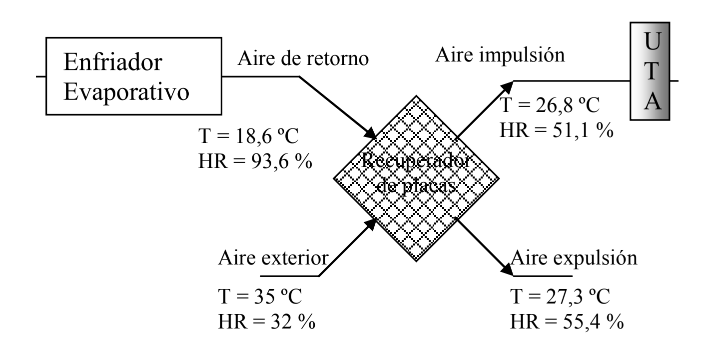


Fig. 22. Operación del recuperador de placas en ciclo de verano, con enfriamiento evaporativo.

La potencia recuperada y la eficiencia energética aumentan al utilizar el sistema de enfriamiento evaporativo.

3. Enfriamiento gratuito o free cooling

El sistema de enfriamiento gratuito comúnmente conocido como "free-cooling", es sin duda el líder del ahorro energético. El proceso más sencillo es el denominado free cooling por aire, que consiste en utilizar aire del exterior, normalmente sólo filtrado, en vez de recircular aire del retorno, por tener unas características energéticas que le hacen más eficiente energéticamente que el aire procedente del retorno.

Los denominados como ciclos economizadores son ciclos de acondicionamiento de aire que utilizan el enfriamiento gratuito, bien directamente aportando aire exterior, o aprovechando el enfriamiento evaporativo del

aire, es decir, utilizando el agua enfriada en una torre de enfriamiento, en lugar de una refrigeración procedente de un sistema convencional de producción de frío por compresión mecánica de un refrigerante, para conseguir las condiciones de confort térmico en los espacios interiores de un edificio.

La normativa española en su Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE) recoge lo siguiente en su Instrucción Técnica IT 1.2.4.5.1 referente a los sistemas de enfriamiento gratuito por aire exterior:

- Los subsistemas de climatización del tipo todo aire, de potencia térmica nominal mayor que 70 kW en régimen de refrigeración, dispondrán de un subsistema de enfriamiento gratuito por aire exterior.
- En los sistemas de climatización del tipo todo aire es válido el diseño de las secciones de compuertas siguiendo los apartados 6.6 y 6.7 de la norma UNE-EN 13053 y UNE-EN 1751:
  - Velocidad frontal máxima en las compuertas de toma y expulsión de aire: 6 m/s.
  - Eficiencia de temperatura en la sección de mezcla: mayor que el 75%.
- En los sistemas de climatización de tipo mixto agua-aire, el enfriamiento gratuito se obtendrá mediante agua procedente de torres de refrigeración, preferentemente de circuito cerrado, o, en caso de empleo de máquinas frigoríficas aire-agua, mediante el empleo de baterías puestas hidráulicamente en serie con el evaporador.
- En ambos casos, se evaluará la necesidad de reducir la temperatura de congelación del agua mediante el uso de disoluciones de glicol en agua.

Por lo tanto, el objetivo de un sistema free-cooling es reducir la energía necesaria para la adecuación higrotérmica del aire impulsado por los sistemas de acondicionamiento, aprovechando las características energéticas más favorables de las que dispone el aire exterior en determinados momentos.

3.1. Conceptos de operación

Las situaciones más habituales son aquellas en las que las características que se precisan para que el aire de impulsión sea capaz de vencer las cargas internas de los locales están más próximas a las que posee el aire del retorno que a las del aire exterior. En esta situación será más ventajoso energéticamente utilizar aire recirculado, manteniendo los caudales mínimos de ventilación exigidos por la normativa e intentando utilizar recuperadores de energía para no incrementar el consumo energético de la instalación.

Evidentemente en la estación invernal las demandas principales de los edificios suelen ser de calefacción, pero hay locales que por sus características específicas, como comercios, salas de fiestas, restaurantes, etc., poseen una elevada carga latente y sensible. En esta situación, si las condiciones existentes en el aire exterior son más adecuadas que las del aire procedente del local, resulta más eficaz utilizar aire del exterior para enfriar el local que no tener que poner en funcionamiento un sistema de enfriamiento convencional por compresión mecánica.

El símil sería abrir una ventana cuando en el interior hace calor y en el exterior se dispone de aire más fresco, pero en este caso en vez de abrir una ventana se pone en funcionamiento un ventilador y una serie de compuertas, que permitirán introducir el aire exterior más fresco en los locales acondicionados.

Además de ser más económico utilizar aire frío del exterior para disipar las cargas internas, al aumentar el caudal de aire exterior, repercutirá en una mejora de la calidad del aire interior (IAQ).

Para poder utilizar un sistema de enfriamiento gratuito por aire, es necesario que los sistemas de climatización de los locales sean por aire y que las unidades de tratamiento de aire estén equipadas con los adecuados sistemas de compuertas, ventiladores y control, necesarios para realizar un control adecuado de la instalación.

El sistema free-cooling debe permitir mediante un control adecuado seleccionar las diferentes situaciones que se pueden plantear de cargas internas y climáticas, actuando sobre las compuertas de aire y los equipos que deben estar en operación, para conseguir que el aire de impulsión alcance las condiciones higrotérmicas adecuadas con el menor coste energético.

3.2. Sistemas de operación por aire y agua

Existen dos tipos de sistemas para poder aprovechar las condiciones energéticas del aire exterior, bien utilizar directamente el aire exterior, o bien aprovechar un menor contenido en entalpía del aire exterior para enfriar agua en una torre de refrigeración, utilizándolo para enfriar, normalmente mediante una batería de tubos de cobre aleteados, el aire que se impulsará al interior de los locales.

3.2.1. Sistemas de enfriamiento gratuito por aire exterior

Cuando la entalpía del aire exterior o en su caso la temperatura dependiendo del sistema de control utilizado, es inferior a la entalpía o temperatura del aire procedente del local, será más eficiente energéticamente utilizar aire exterior que no recircular aire de retorno del local.

Estos sistemas consiguen utilizar la capacidad de enfriamiento gratuito del aire exterior, incrementando hasta un 100 % el aire de ventilación que forma parte del aire impulsado, no teniendo aire de recirculación y evitando tener que poner en funcionamiento el proceso convencional de enfriamiento por refrigeración mecánica. De esta manera será el aire exterior el encargado de disipar incluso el total de la carga térmica del local. A menudo la reducción del consumo energético por la utilización de sistemas free cooling no evita el tener que apoyar al sistema de enfriamiento con algún sistema de compresión mecánica.

Por lo mencionado anteriormente, los sistemas de free cooling por aire, atendiendo al control, se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Sistemas de enfriamiento gratuito por control de entalpía. Precisaría de una etapa de enfriamiento evaporativo directo que reduzca la temperatura del aire por debajo de la del espacio acondicionado.
- Sistemas de enfriamiento gratuito por control de temperatura.

En cualquier caso el control procurará mantener las condiciones de temperatura y humedad en el interior del espacio acondicionado.

El dispositivo consta de un sistema con tres compuertas de aire colocadas de manera que la compuerta de aire de retorno está en serie con los ventiladores de aire de retorno e impulsión, mientras que las otras dos compuertas están en paralelo, la de expulsión en el circuito del ventilador de retorno y la de aire exterior en el circuito del ventilador de impulsión, como se puede ver en la figura 23.

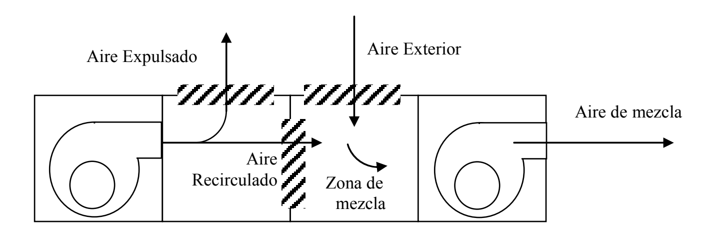


Fig. 23. Enfriamiento gratuito por aire.

Las velocidades frontales de toma y expulsión de aire serán como máximo de 6 m/s y la eficiencia de temperatura en la sección de mezcla debe ser de al menos el 75 %.

El diseño del sistema debe tener en cuenta que los caudales de aire en juego pueden ser diferentes en las dos posiciones extremas del dispositivo, al igual que en cualquier posición intermedia del mismo.

La compuerta de retorno podrá tener un tamaño inferior al de las otras dos compuertas, incluso en la situación en que su tamaño pueda ser insuficiente para poder equilibrar los circuitos. Para un perfecto equilibrado es necesario instalar, en serie con la compuerta de retorno, una chapa perforada de características adecuadas para permitir la regulación.

La terna de compuertas se deberá dimensionar con una caída de presión que, por lo menos, sea igual al 10 % de la presión del ventilador, con el fin de asegurar que las compuertas tengan la debida autoridad. Cuando las pérdidas de presión sean inferiores al 20 % es recomendable que las compuertas sean del tipo lamas paralelas, no en oposición, con el fin de que la variación de caudales de aire sea lineal al variar la posición de la terna de compuertas.

3.2.2. Sistemas de enfriamiento gratuito por agua

En esta instalación se utiliza el agua procedente de una torre de refrigeración, que idealmente puede ser enfriada hasta la temperatura de saturación adiabática (muy próxima a la temperatura húmeda o de bulbo húmedo) para enfriar el aire enviado a la unidad de tratamiento, donde el consumo energético de adecuación será inferior a aquella situación donde no se hubiera dispuesto de la refrigeración procedente del sistema de enfriamiento gratuito con agua.

La disposición esquemática de esta instalación es la que se presenta en la figura 24.

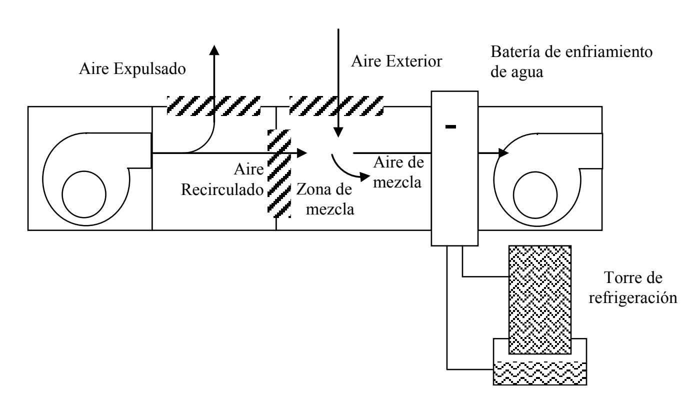


Fig. 24. Enfriamiento gratuito por agua.

3.2.3. Sistema combinado de enfriamiento gratuito con sistemas de recuperación de energía

Finalmente existe la alternativa de poder utilizar alguno de los recuperadores de energía analizados en el apartado anterior, si están equipados con una zona de by-pass que permita operar en modo free-cooling por aire exterior.

Los recuperadores que pueden aportar free-cooling son aquellos en los que deben confluir en el mismo espacio físico la corriente de aire de expulsión y la de ventilación, por ejemplo, rotativos o de placas (ver figura 25).

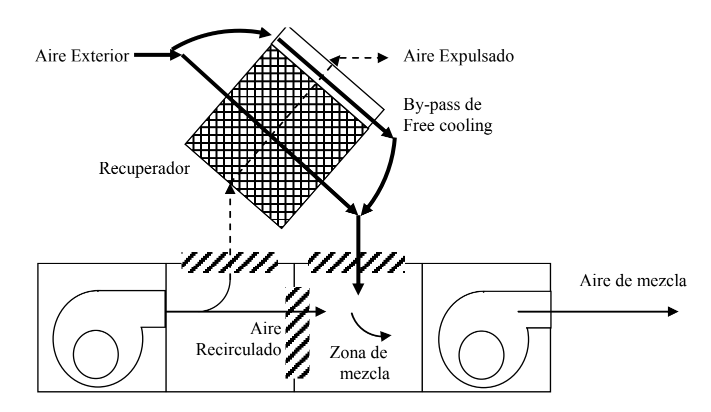


Fig. 25. Sistema combinado free cooling y recuperación de energía.

En estos sistemas se utilizará el recuperador de energía cuando sea necesario utilizar aire exterior, aunque posea unas características energéticas peores que el aire de retorno. En estas situaciones el recuperador permitirá reducir la energía eliminada en el aire de expulsión, aportándosela al aire exterior.

Cuando las condiciones del aire exterior sean más adecuadas energéticamente que las del aire procedente del local, no resulta rentable aprovechar la energía del aire expulsado y el aire de ventilación no pasa a través del recuperador.



3.3. Criterios de operación

A continuación se presentan las características principales de los sistemas de free cooling por aire, equipados con control por entalpía o por temperatura del aire exterior, los sistemas que utilizan agua procedente de una torre de refrigeración y los combinados con recuperación de energía.

3.3.1. Enfriamiento gratuito del aire exterior por control de entalpía

En las figuras 26 y 27 se muestran los esquemas de operación y el sistema de control así como la representación en el diagrama psicrométrico del sistema de enfriamiento gratuito por control de entalpía.

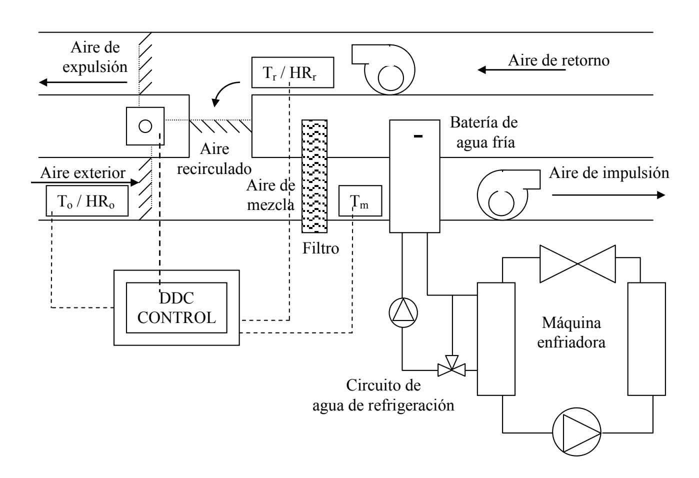


Fig. 26. Esquema de operación y control por entalpía de un free cooling por aire.

El control del sistema está basado en la comparación de entalpía y es el siguiente:

- Se miden la temperatura seca (T) y la humedad relativa (HR) del aire exterior y del aire de retorno. Ambas señales se envían a un controlador (DDC), para calcular las entalpías del aire exterior ho y la entalpía del aire de retorno hr, que puede ser recirculado a la instalación, comparando ambos valores.
- Si ho > hr el regulador envía una señal al actuador del servomotor de las compuertas de aire de modo que las compuertas de aire exterior y aire de expulsión están cerradas en la mínima posición, asegurando el mínimo aporte de aire de renovación. La compuerta de aire recirculado estará abierta completamente (posición máxima permitida).
- Si ho ≤ hr el regulador se encargará de que las compuertas de aire exterior y de aire de expulsión estén completamente abiertas y al mismo tiempo las compuertas de recirculación estarán completamente cerradas.
- Un sensor de temperatura mide la temperatura (Tm) de la mezcla (aire exterior y aire recirculado). Esta señal es comparada con la del punto de consigna T*. Cuando la temperatura del aire exterior To ≤ T*, entonces el regulador del equipo envía una señal al actuador para modular la apertura de las compuertas de aire de expulsión y de recirculación para mantener la temperatura del aire de mezcla en el valor que establece la consigna T*. En esta situación con temperatura del aire exterior inferior a T* el compresor del equipo de producción de frío debe estar parado.

Obsérvese que existe una zona donde el aire puede tener menor temperatura, pero un contenido superior en humedad específica. Introducir aire en estas condiciones puede ocasionar un incremento en la humedad del local acondicionado.

La zona con temperatura superior a la de consigna, aunque tiene menor entalpía, precisaría de un sistema de enfriamiento adiabático para proporcionar aire de ventilación en las condiciones adecuadas. Esta dificultad hace que normalmente se limite la zona de operación a aquella que posee temperatura inferior a la de consigna.

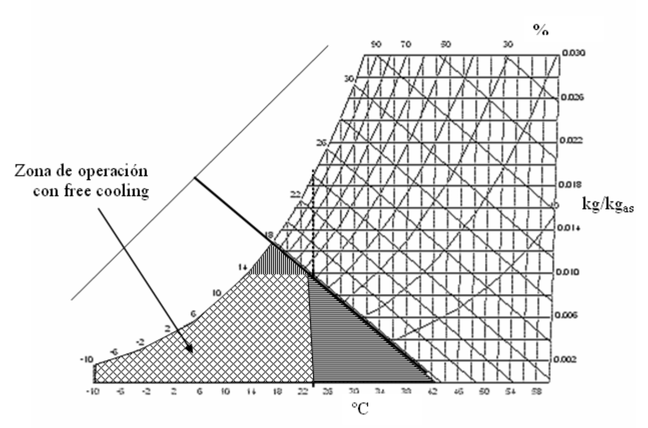


Fig. 27. Zona de control por entalpía en un diagrama psicrométrico.

En teoría se consigue más eficiencia energética con el control de entalpía que con el control de temperatura. Sin embargo, para poder calcular los valores de entalpía se precisan sondas de temperatura y humedad, por lo que desde un punto de vista práctico, dado que las sondas de humedad son menos precisas y pueden proporcionar errores incluso del 10 %, como consecuencia de una baja precisión o de derivaciones de la calibración en cortos periodos de tiempo, es dificultoso su mantenimiento, y adicionalmente su precio es relativamente elevado, por lo que hacen que el sistema más utilizado de control de enfriamiento gratuito sea el de temperatura.

3.3.2. Enfriamiento gratuito del aire exterior por control de temperatura

Resulta más sencillo comparar solamente temperaturas secas utilizando una única sonda de temperatura, que el

sistema de medida y control necesario para poder hacer el estudio comparativo de entalpía.

En las figuras 28 y 29 se presentan los esquemas de operación y el sistema de control así como la representación en el diagrama psicrométrico del sistema de enfriamiento gratuito utilizando control de temperatura.

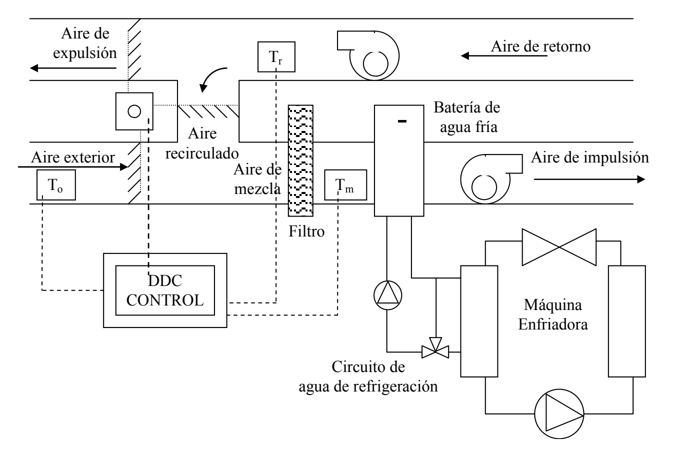


Fig. 28. Esquema de operación y control por temperatura de un free cooling por aire.

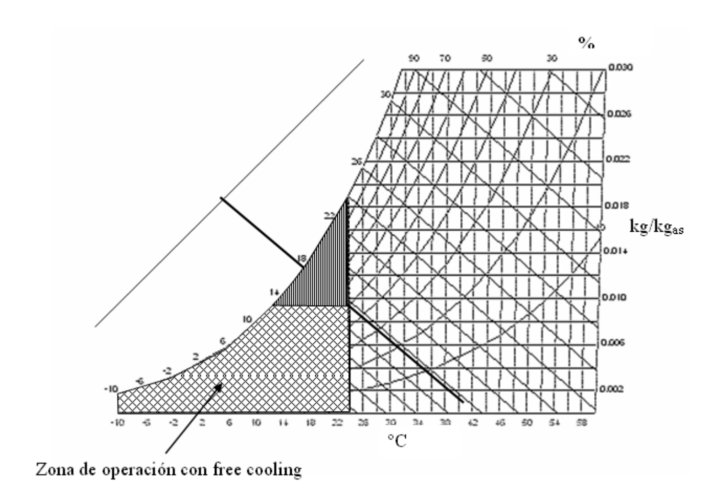


Fig. 29. Zona de control por temperatura en un diagrama psicrométrico.

Las etapas de comparación se realizan entre la temperatura del aire exterior T_o con la temperatura del aire recirculado T_r, o con el valor de un punto de consigna predeterminado, en el caso de que este punto se pretenda sea diferente al de la consigna del local. El control del sistema es el siguiente:

- Se comparan las lecturas de las sondas de temperatura del aire exterior T_o con la del aire de retorno T_r.
- Si $T_o > T_r$ el regulador del equipo DDC de control envía una señal al actuador del servomotor de las compuertas cerrando las de aire exterior y aire de expulsión hasta la mínima posición, asegurando el mínimo aporte de aire de renovación, permaneciendo abierta al máximo la compuerta de aire recirculado.
- Si $T_o \leq T_r$ las compuertas de aire exterior y expulsión estarán totalmente abiertas, y la compuerta de aire recirculado totalmente cerrada.
- Al igual que ocurría en el sistema de control por entalpías, existe una sonda de temperatura adicional que mide la temperatura del aire de mezcla. Cuando la temperatura exterior sea inferior a la temperatura establecida como consigna del aire de impulsión, $T_o \leq T^*$, entonces el regulador del equipo DDC modula la posición de las compuertas de aire (exterior, expulsión y recirculado) de manera que se mantenga la temperatura de la mezcla del aire en el valor establecido en la consigna T*. En esta situación, al igual que ocurría en la analizada anteriormente, el sistema de producción de frío convencional estará parado.

Una comparación de los sistemas de control por temperatura y por entalpía, además de los requerimientos superiores en sondas y en su mantenimiento para el de entalpía, presentan como principal diferencia la utilización en función del clima exterior.

En la figura 30 se representa en un diagrama psicrométrico las diferencias entre las zonas donde se produce el control, en función de si se realiza por temperatura o por entalpía.

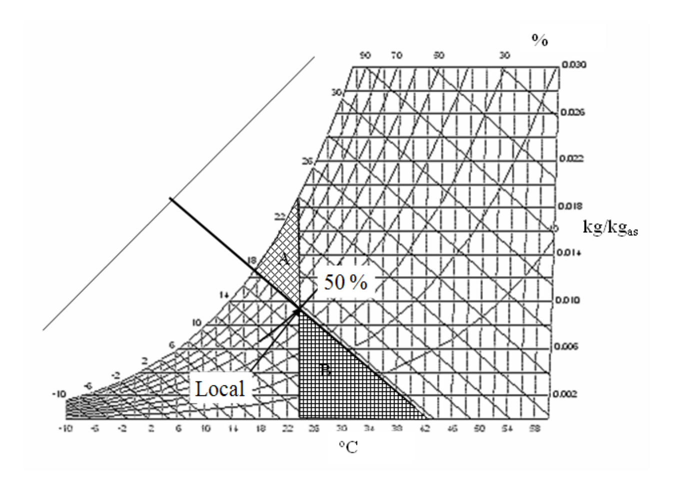


Fig. 30. Diferencia entre las zonas de control por temperatura y entalpía.

Cuando las condiciones termohigrométricas del aire exterior se sitúan dentro del área marcada como A en el diagrama psicrométrico anterior, un control de entalpía proporciona más ahorro en el enfriamiento y deshumidificación del aire.

Por otra parte, cuando las condiciones del aire exterior se encuentran en la zona B, un control de temperaturas consume normalmente menos energía, a no ser que la UTA disponga de un sistema de enfriamiento evaporativo directo que permita reducir la temperatura humidificando el aire. Hay que recordar que estos sistemas están sometidos al reglamento 865/2003, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.

En consecuencia, se recomienda un control de entalpía en lugares con clima caliente y húmedo. En la mayor parte de las localidades con clima de temperatura y humedad moderadas, el ahorro proporcionado por un control por entalpía es pequeño. Los dos tipos de control difieren sólo entre el 10 y el 20 % de ahorro conseguido, y como el mantenimiento de las sondas de humedad necesarias para el control por entalpías es dificultoso, se suele recomendar el control por temperaturas.

Para localidades con clima seco, el control por temperaturas es muy adecuado ya que proporciona niveles de ahorro similares al del control por entalpías. No obstante, en estos climas, los sistemas de refrigeración evaporativa, según veremos a continuación, pueden proporcionar ahorros elevados pero precisan en la unidad de tratamiento UTA una etapa adicional para la humidificación, y un mantenimiento estricto del sistema que asegure la limpieza del sistema de bacterias como la legionella, típica de estos tipos de instalaciones [8].

Finalmente cabe indicar que el ahorro energético conseguido por un sistema equipado con enfriamiento gratuito de aire frente a sistemas que no lo poseen se encuentra en el intervalo del 15 al 40 % de la energía total utilizada dependiendo de la climatología de la localización geográfica correspondiente.

3.3.3. Enfriamiento gratuito por agua

Consideremos un enfriamiento de aire mediante agua como el que se muestra en la figura 31.

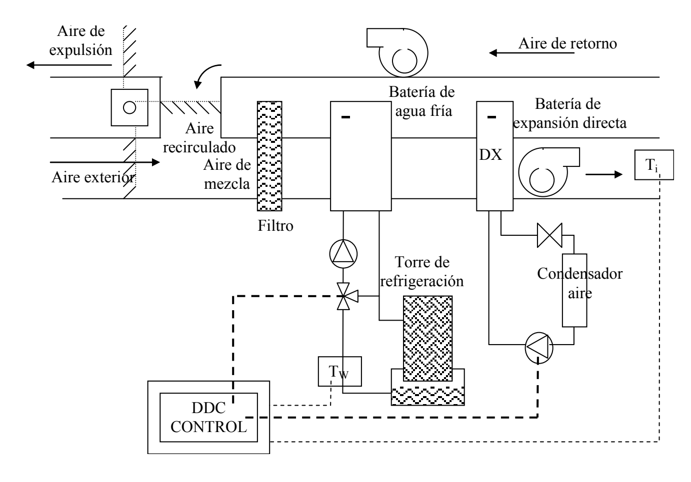


Fig. 31. Esquema de operación y control de un free cooling por agua.

Las condiciones habituales de operación de este sistema en la instalación son las siguientes:

- Se considera que el grado de acercamiento, definido como la diferencia de temperatura entre el agua a la salida y la de bulbo húmedo del aire a la entrada, en la torre de enfriamiento (habitualmente denominada de refrigeración) es de 3 ºC.
- La temperatura de mezcla T_m del aire exterior y del aire recirculado es de 26 ºC.
- La diferencia de temperaturas entre T_m y la temperatura del agua enfriada T_W es de 3 ºC.
- Cuando la temperatura de bulbo húmedo del aire exterior sea $T_h \leq 5$ ºC, el agua fría podrá reemplazar la refrigeración mecánica mediante la batería de agua, cuya temperatura será igual o inferior a 8 ºC.
- La temperatura de bulbo húmedo del aire exterior, por debajo de la cual el enfriamiento gratuito utilizando este control por agua puede ser eficaz, es $T_h \leq 20$ ºC.

Durante la operación de enfriamiento de aire con agua, las condiciones climáticas pueden ser divididas en tres zonas en función de la temperatura de bulbo húmedo del aire exterior, según se muestra en la siguiente figura 32.

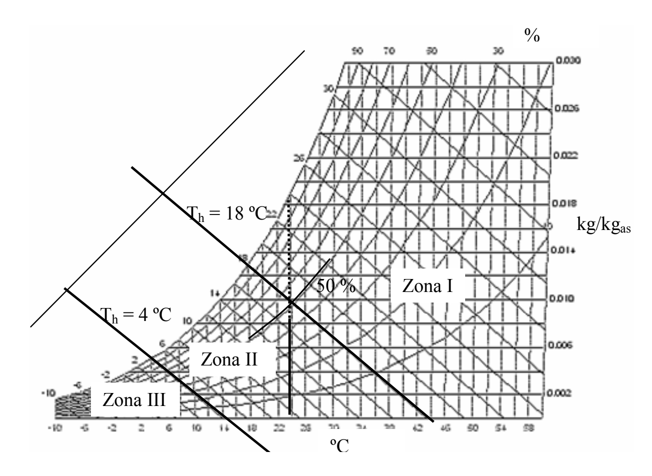


Fig. 32. Zonas recomendadas de control de un free cooling por agua.

El sistema, utilizando enfriamiento de aire con agua, para el aire exterior situado en las diferentes zonas marcadas en el diagrama psicrométrico, funciona como se expone a continuación:

- En la Zona I la torre de refrigeración está parada, pues no se puede aportar agua a temperatura suficientemente baja.
- En la Zona II, está operando y remplaza parte de la refrigeración mecánica, reduciendo la demanda de energía que tiene que aportar el sistema convencional.
- En la Zona III remplaza totalmente a la refrigeración mecánica.

La división de las zonas I y II está caracterizada por la línea de temperatura húmeda, que para las condiciones supuestas en este local correspondería a 18 ºC. Por debajo de este valor el enfriamiento de aire utilizando agua enfriada en una torre de refrigeración puede operar de manera efectiva. La división entre las zonas II y III está caracterizada por la temperatura húmeda, que en esta situación se ha supuesto de 4 ºC, que es capaz de enfriar el aire hasta las condiciones donde se pueden compensar todas las cargas de refrigeración del sistema de climatización. Por debajo de ese valor la máquina de producción de frío por compresión mecánica estará parada.



El control del sistema basado en el enfriamiento gratuito de aire con agua, es el siguiente:

- La temperatura T_W de enfriamiento del agua a la salida de la torre de refrigeración, medida por una sonda, es comparada con el valor de la consigna, que se establece con el valor de la temperatura húmeda del local T_{hr}, en el caso planteado de 18 ºC.
- Si el valor de temperatura T_W es menor que el de T_{hr}, en esta situación el sistema de control actúa sobre el regulador de apertura de la válvula y todo el flujo de agua enfriado en la torre es enviado a la batería de agua fría.
- Si la temperatura del aire de impulsión T_i es menor que la establecida como consigna de la impulsión T* predeterminada en el sistema de control, se actúa sobre la válvula de tres vías del circuito de agua modulando el caudal de agua alimentado a la batería de agua fría, para conseguir la temperatura de consigna establecida.
- Cuando el valor medido de la temperatura del agua T_W es suficientemente baja (normalmente la temperatura establecida es de 10 ºC), entonces el sistema de control DDC detiene la máquina de refrigeración por compresión.
- Si el valor de la temperatura de agua T_W es inferior a 2 ºC, el sistema de control DDC, detiene el sistema de enfriamiento de aire por agua, con el fin de protegerlo de una posible congelación del agua.

Las ventajas de un sistema de enfriamiento gratuito por aire frente a las que presenta el sistema que utiliza agua enfriada en torre de refrigeración son las siguientes:

- Consiguen una mejor calidad del aire interior (IAQ) debido a que se impulsa un mayor flujo de aire exterior.
- El consumo de energía de un sistema de acondicionamiento de aire con enfriamiento por aire es aproximadamente un 20% menor que el correspondiente en agua.
- Las torres de refrigeración, al igual que se ha indicado para los sistemas de enfriamiento adiabático, según establece el Real decreto 865/2003 sobre prevención y control de la legionella, requieren un mayor mantenimiento y en consecuencia, un encarecimiento de los costes asociados a la utilización del sistema.

En cuanto a la principal desventaja que presenta el sistema de aire frente al de agua es que cuando las condiciones climáticas exteriores cambian frecuentemente, el sistema de aire puede introducir fluctuaciones en el espacio acondicionado siendo menos estable que los sistemas de agua.

Adicionalmente, el sistema de enfriamiento gratuito por agua aumenta el rango de las condiciones de operación, pues puede conseguir temperaturas del agua adecuadas, aunque la temperatura del aire ambiente sea superior a la del local, cuando la humedad exterior sea suficientemente pequeña.

3.3.4. Sistema combinado de enfriamiento gratuito con recuperación de energía

Según se ha presentado anteriormente, las máquinas equipadas con un sistema de free-cooling por aire exterior disponen de un ventilador de retorno y un juego de compuertas motorizadas, comandadas por un regulador automático en función de las condiciones de entalpía o temperatura del aire exterior y del retorno del local.

Este sistema puede ser compatible con la utilización dentro de la instalación de un recuperador de energía, que funcionará con los mismos criterios establecidos anteriormente dependiendo del resultado de comparar las variables energéticas (temperatura o entalpía según el control y si el recuperador es de calor sensible o entálpico) de las corrientes de aire exterior y de retorno.

El aprovechamiento de las aportaciones gratuitas de frío por aire exterior no se hace siempre, como sería deseable. La causa principal hay que buscarla en el hecho de que la instalación puede no estar preparada para ello.

Los sistemas todo aire están capacitados para cumplir este cometido cuando las unidades de tratamiento están dotadas de la correspondiente sección de compuertas y conducciones que permitan el by-pass del aire exterior necesario para operar en modo free-cooling. Adicionalmente, la operación de los sistemas de enfriamiento gratuito aporta un exceso de aire de ventilación, que mejora la calidad del aire interior y permite reducir la carga contaminante del interior de los locales, por lo que serán preferentes a la recuperación de energía.

En la figura 33 se presenta un esquema de operación de una unidad equipada con recuperador y posibilidad de by-pass del aire exterior (free-cooling).

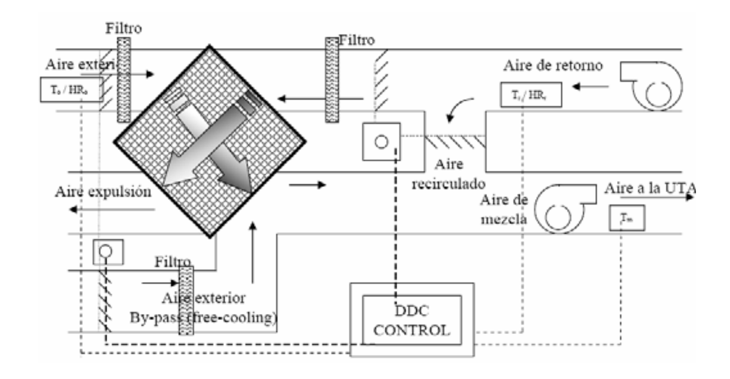


Fig. 33. Esquema de operación y control de un free cooling combinado con un sistema de recuperación de energía.

El sistema de control DDC, además de regular la posición de compuertas para alimentar el aire que posee las condiciones energéticas más favorables para ser procesado, establece la posición de las compuertas para determinar si el aire exterior es más conveniente que circule por el recuperador de energía o si energéticamente es preferible que el aire entre directamente al sistema de tratamiento, por una zona de by-pass, actuando como free-cooling.

3.4. Casos prácticos. Cálculo de ahorro de energía

A continuación se presenta un análisis de las posibilidades del free-cooling por aire para reducir la demanda energética de refrigeración en función de las distintas condiciones que se pueden dar en la climatología española [9].

Para el análisis se ha utilizado un entorno de simulación empleado en ingeniería e investigación, equipado con un módulo que permite simular sistemas de enfriamiento gratuito (free-cooling), que determina las proporciones adecuadas de la mezcla del aire de retorno y aire exterior para reducir la demanda de refrigeración a cubrir por un sistema convencional con control de temperatura del aire de impulsión.

Como datos de entrada se establecen las condiciones del aire exterior y del aire de retorno (presión, temperatura y humedad relativa u otra magnitud equivalente). Asimismo se debe especificar el caudal másico total de aire de impulsión y la fracción mínima de aire exterior permitida dentro de ese caudal de impulsión. Finalmente también se deben indicar dos temperaturas de consigna: una para la temperatura del aire del local y otra para la temperatura mínima de impulsión (equivalente a la temperatura constante del aire impulsado a partir del sistema convencional situado aguas abajo y que denominaremos T_{bat}).

Se ha considerado que si el aire exterior estuviese a una temperatura inferior a esta última y se impulsase todo aire exterior, se tendrían unas condiciones de discomfort debidas a esta temperatura demasiado baja. De este modo, esta restricción dada por la temperatura mínima de impulsión fija un límite superior para la cantidad de aire exterior impulsado en determinadas condiciones exteriores.

En cada paso de cálculo se determinan las condiciones del aire en cada punto del sistema (exterior, retorno, expulsión, condiciones del local y condiciones hipotéticas en la impulsión del sistema convencional).

En caso de tener un caudal de impulsión no nulo, el modelo comprueba primeramente dos situaciones particulares:

A. Si la temperatura del exterior es superior a la del local, independientemente de la señal de control del componente, la fracción de aire exterior impulsada será la mínima posible, pues cualquier incremento del aire exterior impulsado aumentará las necesidades de refrigeración que deba cubrir el equipo convencional. Por tanto, en esta situación, el flujo másico de aire exterior será el de impulsión, por la fracción mínima del aire exterior prefijada.

$$\dot{m}_{OA} = \dot{m}_{imp} \cdot f_{oa,\min}$$

B. Si la temperatura del exterior se encuentra entre la temperatura mínima de consigna de la impulsión y la temperatura de consigna del local, la fracción de aire exterior será la máxima posible.

$$\dot{m}_{OA} = \dot{m}_{imp} \cdot f_{oa,\max}$$

Para estas situaciones, aplicando las ecuaciones básicas de mezcla se obtienen las propiedades del aire de impulsión (humedad y entalpía específica) utilizando las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$w_{mez} = \frac{w_{OA} \cdot \dot{m}_{OA} + w_r \cdot \dot{m}_r}{\dot{m}_{imp}}$$

$$h_{mez} = \frac{h_{OA} \cdot \dot{m}_{OA} + h_r \cdot \dot{m}_r}{\dot{m}_{imp}}$$

Siendo:

- h: entalpía específica del aire seco, kJ/kg_{as}
- w: humedad específica del aire seco, kg_{agua}/kg_{as}
- $\dot{m}$: flujo másico de aire seco, kg_{as}/s
- f: fracción de aire (%)

Subíndices:

- OA: aire exterior.
- r: aire recirculado.
- imp: aire impulsado.
- mín: valor mínimo del aire exterior.
- máx: valor máximo del aire exterior (100 %).

Si ninguno de los casos anteriores (A y B) se cumplen y la temperatura exterior es inferior a la temperatura de la batería fría T_{bat}, entonces el modelo ejecuta un proceso iterativo partiendo de la asunción de mínima fracción de aire exterior, calculando las propiedades de la mezcla de impulsión y comparándolas con la consigna de batería. Si está por encima de ésta, se irá incrementando en cada iteración la fracción de aire exterior aportada, hasta encontrar aquel valor que haga que la temperatura de impulsión sea precisamente la de consigna de salida de la batería.

Finalmente, tras cualquiera de los supuestos anteriores, una vez calculada la fracción de aire exterior, el modelo obtiene dos flujos energéticos: la cantidad de energía debida al aire exterior (carga de ventilación) y la cantidad de energía térmica ahorrada por el uso de la operación por free cooling en cada instante. Las ecuaciones que permiten realizar el cálculo de la carga de ventilación en el sistema de free cooling ($\dot{Q}_{OA}$) y de la energía ahorrada ($\dot{Q}_{ahorro}$) son:

$$\dot{Q}_{OA} = \dot{m}_{imp} \cdot (h_r - h_M)$$

$$\dot{Q}_{ahorro} = (f_{OA} - f_{OA,\min}) \cdot \dot{m}_{imp} \cdot (h_r - h_{OA})$$

Para la determinación de la reducción de la demanda de refrigeración asociada al uso del free-cooling por aire, se plantearon dos sistemas sobre un mismo tipo de edificio de referencia y se realizaron las simulaciones correspondientes a cada una de las 12 zonas climáticas definidas por el Código Técnico de la Edificación para la geografía española [10]. Esta metodología permite obtener unos resultados comparables en términos de ahorro entre los distintos sistemas simulados.

El edificio de referencia escogido es el que se presenta en la figura 34.

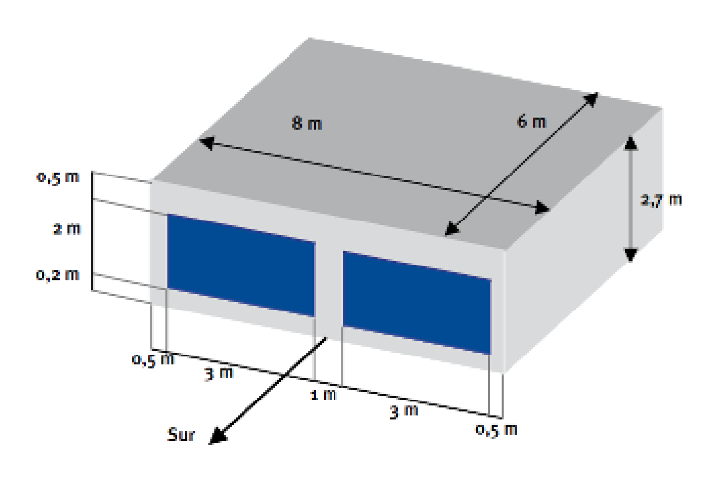


Fig. 34. Edificio seleccionado para realizar el análisis.

El análisis del ahorro presentado se ha definido en base a las siguientes características adicionales:

- Se ha simulado el comportamiento de cuatro sistemas de ahorro y recuperación de energía en una instalación de climatización todo aire sobre el edificio de referencia de una única zona.
- El sistema simulado sólo combate carga sensible.
- El caudal másico de aire exterior impulsado al local que se ha escogido es de 350 kg/h. El caudal corresponde a unas 2 renovaciones de aire por hora. Es superior al valor mínimo de aire de ventilación requerido para obtener una calidad de aire interior IDA 2 (0,83 l/m^{2}s) de acuerdo al RITE.
- Se ha dispuesto un sistema de control diferencial que regula la operación de los equipos simulados. Para todos ellos, se ha definido una temperatura de control de 26ºC, de forma que si la temperatura del local supera este valor, el sistema de refrigeración entra en operación. En este comportamiento se ha supuesto que una vez puesto en marcha el sistema de enfriamiento, no se detiene hasta que la temperatura del local disminuye por debajo de los 23ºC.
- Si el sistema simulado no es capaz de vencer la carga de refrigeración y la temperatura del local sigue aumentando pese a haber entrado en funcionamiento el enfriamiento gratuito, entraría a funcionar un sistema convencional de refrigeración. Tal sistema no ha sido concretado, sino que se ha impuesto el cálculo de la demanda de refrigeración que debería cubrir para mantener las condiciones de temperatura del local en 26,1ºC.

Se consideran dos casos de estudio:

- En el primero (caso A), que constituye el escenario base, no se simula ningún equipo de refrigeración aparte del sistema convencional al cual se asocia la demanda de refrigeración del edificio. El aire tomado del exterior es directamente impulsado por un ventilador axial al interior del local. Esto añadirá una carga de ventilación a las distintas cargas internas y externas asociadas a las características propias del edificio, contribuyendo a aumentar la demanda de refrigeración que debe cubrir el sistema convencional. Esta carga debida al aire exterior es una carga inevitable que estará presente igualmente en el escenario de free-cooling. Obviamente, será de la misma magnitud, ya que a efectos de obtener resultados comparables, tal como ya se ha señalado, el caudal de aire exterior es el mismo en los dos casos analizados.
- En el segundo caso de estudio (caso B) se simula la instalación con un sistema free cooling por aire. Su funcionamiento ha quedado bien descrito en apartados anteriores. No obstante, en este punto es necesario indicar algunas particularidades de sus parámetros de operación.

  La principal característica del sistema simulado es el rango de regulación de la fracción de aire exterior impulsada. El sistema se ha definido de forma que impulsa un caudal de aire constante al local de 1050 kg/h. De ellos, es decir, que como mínimo en todo momento se impulsan 350 kg/h de aire exterior, al igual que en el resto de casos anteriores. El resto hasta los 1050 kg/h puede ser o aire de retorno del local que es recirculado no suponiendo efecto alguno en términos energéticos, o aire exterior si las condiciones son favorables para combatir la carga de refrigeración del local, o bien una mezcla de ambos en caso de que la elección de todo aire exterior supusiese la impulsión de aire demasiado frío al local. Esta consideración se tiene en cuenta mediante una temperatura de consigna que limita la mínima temperatura del aire de impulsión a 15ºC.

  Por otra parte, una señal de control rige el funcionamiento del sistema free-cooling. Esta señal hace que el sistema sólo puede impulsar una fracción de aire exterior mayor en caso de que la temperatura del local sea superior a 26ºC. En caso contrario, siempre impulsa la fracción mínima.

  Por último, se ha de señalar que en este sistema no se incurre en consumos adicionales, dado que la instalación es la misma que en el caso convencional, y toda la demanda de refrigeración cubierta a base de impulsar más aire exterior es gratuita.

Tabla 4
Resumen de los resultados obtenidos en la simulación para ciudades representativas de diferentes zonas climáticas

ZONA CLIMÁTICA	Ciudades ejemplo	CASO DE ESTUDIO								
		Convencional		Enfriamiento gratuito						
		Demanda ANUAL (kWh)	Demanda VERANO (kWh)	No cubierto ANUAL (kWh)	No cubierto VERANO (kWh)	Ahorro ANUAL (kWh_t	(%)	Ahorro VERANO (kWht	(%)	Ahorro ANUAL (kWh_e)
A3	Cádiz	4204,9	1634,3	2783,3	1492,9	1280,2	30,45	141,4	8,65	512,10
A4	Almería	4955,6	2090,6	3746,2	2021,1	1140,0	23,00	69,5	3,32	455,99
B3	Valencia	3957,4	1746,6	2887,4	1667,8	991,2	25,05	78,8	4,51	396,47
B4	Sevilla	5735,2	2699,3	4710,4	2663,9	989,4	17,25	35,4	1,31	395,76
C1	Santander	1381,3	758,0	903,2	615,5	335,6	24,30	142,5	18,80	134,25
C2	Barcelona	2950,1	1400,7	1942,1	1259,8	867,2	29,40	140,9	10,06	346,88
C3	Granada	3958,3	2239,3	3166,9	2207,1	759,3	19,18	32,1	1,43	303,72
C4	Cáceres	4360,2	2569,0	3594,3	2530,7	727,8	16,69	38,2	1,49	291,10
D1	Pamplona	1236,9	823,1	753,9	626,4	286,4	23,16	196,6	23,89	114,56
D2	Valladolid	2447,7	1560,2	1839,9	1459,1	506,6	20,70	101,1	6,48	202,66
D3	Madrid	2838,2	1817,5	2215,9	1753,7	558,5	19,68	63,8	3,51	223,41
E1	Ávila	1398,3	1019,8	986,9	839,5	231,1	16,53	180,3	17,68	92,45

En la tabla 4 se muestra un resumen de los datos más relevantes obtenidos a partir de las simulaciones. En ellas aparece la información para cada una de las zonas climáticas de la geografía española junto con la indicación de las ciudades de referencia representativas de esos climas. De este modo se puede tener una primera noción más intuitiva de sus características climáticas.

Seguidamente bajo el epígrafe 'Conv.' se indica la demanda de refrigeración obtenida para el CASO A (modelo que no considera ningún sistema adicional al convencional) tanto para verano como para todo un año. Igualmente, se muestra la demanda de refrigeración no cubierta por el dispositivo de free-cooling al simular dicho sistema. De ello se derivan los ahorros que se expresan en la tabla en términos absolutos (kWh) y en términos porcentuales respecto de la demanda asociada al CASO A.

Por otra parte, cabe realizar alguna consideración adicional acerca de los resultados derivados de las simulaciones. En este sentido, en el comportamiento del sistema de free-cooling se observan dos situaciones diferenciadas típicas de las condiciones de invierno y de verano respectivamente. En las figuras 35 y 36 se muestran los resultados asociados a cada uno de estos comportamientos:

- En invierno, el aire exterior está demasiado frío, por lo que el sistema free-cooling debe encontrar la mezcla exacta de aire exterior y aire recirculado de forma que la impulsión no se produzca por debajo de la consigna de 15ºC establecida. Así, la fracción de aire exterior impulsada estará en muchas ocasiones en un valor intermedio entre la mínima y el 'todo aire exterior'.
- En cambio, en verano, las temperaturas exteriores no serán tan frías, por lo que es muy común que con temperaturas exteriores por debajo de la temperatura del aire del local, el sistema impulse todo aire exterior cuando el edificio se encuentre en demanda refrigeración y las condiciones del aire exterior lo permitan.

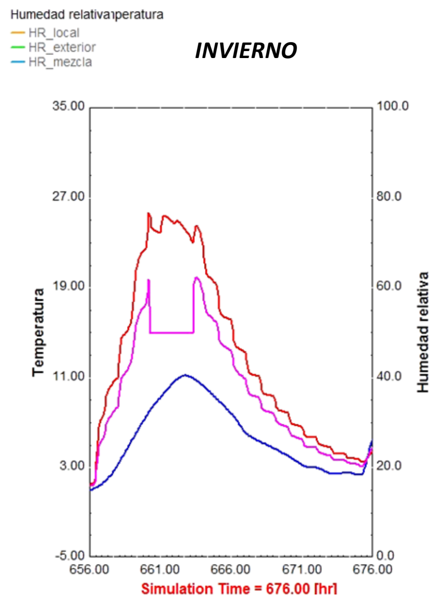


Fig. 35. Simulación en periodo de invierno.

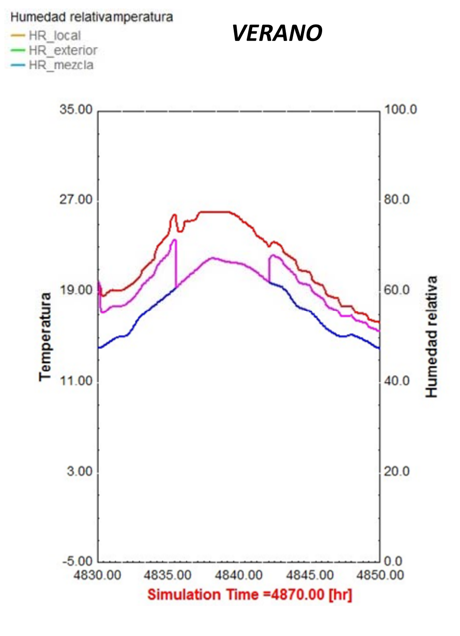


Fig. 36. Simulación en periodo de verano.

Por último, como conclusiones cabe reseñar:

- Las características de comportamiento del sistema de enfriamiento gratuito hacen que en verano su aplicación sea esencialmente interesante en zonas climáticas con temperaturas frescas como son las zonas C1 (18,8 %), D1 (23,9 %) y E1 (17,7 %). Sus prestaciones en términos porcentuales de ahorro obtenido es destacable en estas áreas más favorables, sin embargo, son sensiblemente menores en el resto de zonas climáticas.
- Por otra parte, la simulación del free-cooling en el resto de épocas del año (no sólo en verano) evidencia que este sistema adquiere en estos periodos unas prestaciones claramente superiores. En verano, exceptuando las tres zonas climáticas más frescas mencionadas anteriormente, el porcentaje medio de ahorro se sitúa en un 4,53% debido a que en la mayoría de áreas climáticas la temperatura exterior durante gran parte del tiempo es superior a la temperatura del local y el free-cooling apenas se puede aprovechar. Sin embargo, al contabilizar todo el periodo anual, el porcentaje medio de ahorro con free-cooling por aire en las 12 zonas climáticas españolas, se sitúa en el 22,1% de la demanda total de refrigeración con un valor mínimo de 16,5%. De los valores obtenidos en las simulaciones del periodo anual completo se deduce que las áreas más favorables para este sistema son aquellas con un clima más suave durante todo el año (sin temperaturas extremas, como son las zonas A3 y C2).

4. Proyectos

A continuación se presenta el cálculo de una instalación de acondicionamiento de aire para un caso particular, considerando la posibilidad de introducir recuperación de energía, planteando el ahorro energético introducido con esta opción.

El caso práctico es una planta de oficinas de 165m^2 compuesta por un hall, una sala de reuniones, dos despachos, dos baños, una sala de descanso y una sala de oficinas. La distribución, dimensiones y orientación son las dadas en la figura 37. Esta planta de oficinas se encontrará localizada en Valladolid, y serán los datos climáticos de esta localidad los utilizados para realizar los cálculos.

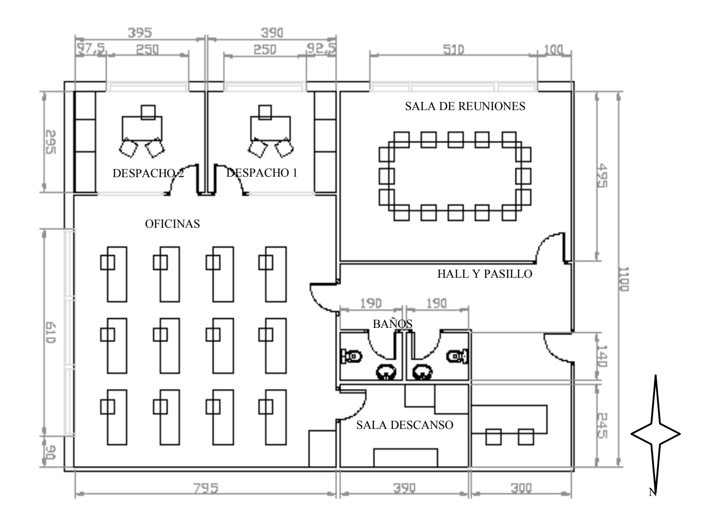


Fig. 37. Planta de oficinas: distribución.

El cálculo de cargas se realiza con el programa comercial, considerándose una única zona compuesta por 7 locales, uno de los cuales, el baño, servirá como modelo a los dos existentes por ser idénticos.

En primer lugar es necesario proporcionar información sobre la composición de los distintos muros, tipos de adyacencias y orientación de aquellos que son exteriores; existencia de puertas y ventanas así como su posición relativa y su tipo.

Las condiciones de trabajo del sistema son las que se indican a continuación:

Para la climatización de la zona se supondrán:

- T impulsión refrigeración = 16ºC
- T impulsión = 28ºC
- Toma de aire exterior en el equipo que abastece la zona.
- Sin control de ventilación, caudal constante (para que permita recuperación).

Asimismo, todos los locales compartirán las mismas características indicadas a continuación:

- Condiciones interiores:
  Verano: Ts=24ºC; HR=50%
  Invierno: Ts=22ºC; HR=50%
- Infiltraciones nulas (locales a sobrepresión)
- Ventilación: como se trata de oficinas, deberemos considerar una calidad del aire interior clasificable

como IDA2; por el método A dado el caso particular. De esta forma deberán suponerse 12,5dm^3/s o 45m^3/h de aire de renovación por persona. Esto será válido para todos los locales exceptuando el baño, en el que deberá tomarse un valor de la ventilación de 15l/s por local.

- Horario de oficina partido: de 7 a 12 y de 14 a 17 horas.
- Recuperador de calor: se supondrá inexistente en el primer caso de estudio, mientras que para el caso II tomaremos un recuperador entálpico de rendimiento 66% en calefacción y 61% en refrigeración [10]. El caudal de ventilación que trata es del 100%.

Aunque el caso particular no se identifica con ninguna de las situaciones de especial interés demostrado de aplicación de la recuperación de energía, sería estrictamente necesario instalar un sistema recuperador, dado que en la IT.1.2.4.5.2 sobre recuperación de calor del aire de extracción del RITE se establece que para caudales de aire expulsado por medios mecánicos al exterior superiores a 0,5m^3/s debe recuperarse la energía de dicho aire expulsado [6], y que por los requerimientos de ventilación especificados para el ejemplo de la planta de oficinas se trabajará con 1953m^3/h o equivalentemente 0,54m^3/s.

Cada local se modelará de forma individual en cuanto a dimensiones, cargas, ocupantes, etc. Toda esta información queda recogida en las Tablas 5 y 6. Nótese que los despachos, a pesar de ser idénticos en dimensiones y solicitaciones, se modelan por separado debido a su distinta orientación; sin embargo se define un único baño duplicado.

Una vez finalizado así el modelado de la planta de oficinas con el programa de cálculo de cargas, puede procederse a obtener los datos de las cargas a soportar por el sistema de acondicionamiento de aire en los dos casos propuestos.

Una vez programadas las características constructivas y operativas del edificio de oficinas se introducen en el programa de cálculo de cargas, el cual proporciona los resultados tanto para cada local por separado como para toda la zona de forma global, los valores de máxima carga de frío/calor en el caso más favorable/desfavorable en los meses de invierno, así como la máxima carga de calor/frío en el caso más desfavorable/favorable durante los meses estivales.

Tabla 5
Condiciones de trabajo particulares en cada local

	Nº máximo de personas	Ventilación [m^3/h]	Ventilación [%]	Superficie [m^2]
Hall y pasillo	2	90	4,61%	24
Sala de reuniones	16	720	36,87%	35
Sala de descanso	5	225	11,52%	10
Despachos (2)	3	135	6,91%	12
Oficinas	12	540	27,65%	64
Baños (2)	1	54	6,22%	3

Tabla 6
Condiciones de trabajo particulares en cada local: distribución de cargas

	Ocupación [%]	Iluminación [%]	Otras cargas [%]
Hall y pasillo	100% durante todo el horario de oficina	100% durante todo el horario de oficina	(Ninguna)
Sala de reuniones	100% de 7 a 8 horas 25% de 8 a 12 horas	100% de 7 a 12 horas	(Proyector de diapositivas) 100% de 7 a 12 horas
Sala de descanso	100% de 9 a 10 y de 15 a 16 horas 20% durante el resto del horario de oficina	100% durante todo el horario de oficina	(Cafetería pequeña) 100% de 9 a 10 y de 15 a 16 horas 20% durante el resto del horario de oficina
Despachos	100% de 10 a 12 horas 33% durante el resto del horario de oficina	100% durante todo el horario de oficina	(Ordenador) 100% durante todo el horario de oficina
Oficinas	60% de 9 a 10 y de 15 a 16 horas 90% durante el resto del horario de oficina	100% durante todo el horario de oficina	(12 ordenadores más una fotocopiadora) 100% durante todo el horario de oficina
Baños	100% durante todo el horario de oficina	100% durante todo el horario de oficina	(Ninguna)

Los resultados de máxima carga permitirían realizar el dimensionado de nuestro sistema en cada uno de los dos casos particulares. La recuperación de calor permitirá dimensionar una instalación de menor potencia, que incidirá en un ahorro de ciertos costes de inversión para suavizar los gastos extra supuestos por los recuperadores, y operación que inicialmente hace prever la rentabilidad de esta opción. No obstante, hay que considerar el incremento de la inversión asociada al recuperador, cuyo precio es elevado.

En las Tablas 7 y 8 se recopilan los resultados para cada caso estudiado de las cargas máximas y consumos estacionales estimados para la planta de oficinas y para cada uno de sus locales individuales.

Para comparar ambos casos en cuanto a ahorro energético, es interesante realizar una estimación del consumo de los equipos a partir de los resultados de cargas máximas, a lo largo del día tipo y por extensión al mes en estudio. Tomando como meses estivales los comprendidos entre junio y septiembre, y como invernales aquellos entre noviembre y marzo, la suma de los consumos a lo largo de estos 9 meses nos dará un valor aproximado del consumo anual de la instalación en cada caso. Esto nos permitirá realizar el segundo paso del análisis, una vez dimensionados los sistemas: plantear la comparativa entre ambos casos. Puesto que hemos trabajado con un programa de cálculo de cargas, para obtener los consumos de los sistemas a lo largo de los distintos meses trabajaremos con días tipo para los cuales obtendremos una estimación del consumo considerando la evolución de la demanda energética proporcionada por el programa.

Tabla 7
Carga térmica máxima y demanda total estacional calculada

		Carga máxima [kW]	**Consumo anual calculado [kWh]**
CASO 1: sin recuperación de energía	Enfriamiento	20	2370,76
	Calefacción	32	3004,00
CASO 2: con recuperación de energía	Enfriamiento	17	2234,42
	Calefacción	13	1176,67

Tabla 8
Cargas máximas y demanda estacional calculada, por locales

LOCAL		**CASO 1: sin recuperación**		**CASO 2: con recuperación**	
		Carga total máxima [W]	Consumo anual [kWh]	Carga total máxima [W]	Consumo anual [kWh]
Hall	Enfriamiento	2008W	231,74	1954	229,72
	Calefacción	5691W	1271,77	4917	1161,30
Sala descanso	Enfriamiento	2014W	246,97	1879	228,66
	Calefacción	1376W	176,88	0	0
Despacho 1	Enfriamiento	1703W	208,93	1649	200,37
	Calefacción	1635W	317,16	468	15,37
Despacho 2	Enfriamiento	1554W	195,17	1500	186,06
	Calefacción	1370W	234,33	203	0
Sala reuniones	Enfriamiento	2580W	284,72	2292	205,96
	Calefacción	3244W	533,86	0	0
Oficinas	Enfriamiento	8211W	1203,23	7908	1183,65
	Calefacción	4639W	470	0	0
Baños	Enfriamiento	351W	-	351	-
	Calefacción	774W	-	774	-



Se va a aproximar el consumo diario para cada mes considerando la media entre la carga máxima y mínima del día tipo correspondiente, y suponiendo que el equipo se encuentra funcionando durante las 8 horas de apertura de las oficinas. En este cálculo se truncarán las horas de carga favorable; es decir, se considerará carga nula durante las horas en las que la carga sea positiva en los meses de invierno y negativa en los de verano, estableciéndose dicho valor como el mínimo en el cálculo de la carga media en cada caso. Este truncamiento se realiza sobre la idea de que durante aquellas horas de apertura de las oficinas en las que la carga es favorable, interesará aprovechar la opción de enfriamiento gratuito por aire exterior. El consumo mensual total se obtendrá como la suma de los consumos parciales de cada local por el número de días del mes, y consiguientemente el consumo anual será el sumatorio de los consumos mensuales obtenidos.

En el segundo caso planteado, la instalación de un recuperador entálpico va a permitir eliminar parte de la carga de ventilación de los locales. Esta reducción en la carga se calcula a partir del valor máximo de carga de ventilación de la planta en cada mes proporcionado por el programa, multiplicándolo por el porcentaje de la ventilación total asociado a cada local particular y por el rendimiento del recuperador según se trate de meses de verano o de invierno. Obtenemos así unos nuevos valores de carga en cada local a soportar por nuestros equipos, que serán considerablemente menores que los del caso inicial. En el cálculo de consumos del segundo caso también ha sido tenida en cuenta la carga de ventilación eliminada con la instalación del recuperador entálpico. Para ello se ha restado del consumo diario el correspondiente a la carga de ventilación de cada local por el rendimiento del recuperador en el mes de estudio.

No se han calculado consumos en los baños, por no encontrarse éstos climatizados.

Se puede observar que el efecto del recuperador en calefacción es considerablemente mayor que en refrigeración. Esto se debe a que se opera con un recuperador entálpico, y las condiciones exteriores en Valladolid en invierno respecto a las interiores permiten no sólo un alto intercambio sensible sino también latente; mientras que las condiciones exteriores en verano en esta localidad no permiten apenas intercambio de calor latente.

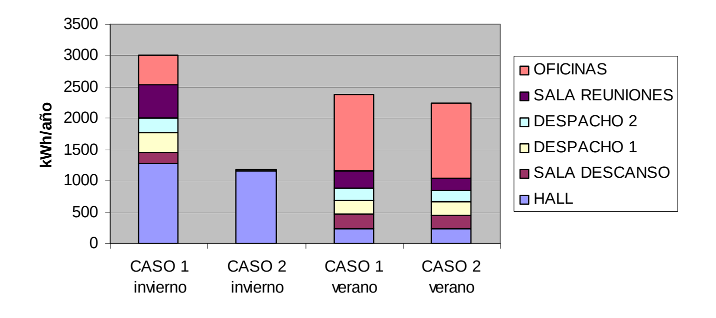


Fig. 38. Distribución del consumo anual por locales en los dos casos de estudio.

A partir de los resultados de las demandas estacionales, vamos a obtener una estimación de los consumos energéticos del sistema en cada uno de los dos casos.

La carga de ventilación eliminada gracias a la instalación del recuperador entálpico va a ocasionar que haya casos en los que la carga del propio local sea incluso favorable respecto a los requerimientos de la estación en cuestión, y por lo tanto los valores obtenidos en esos meses se consideran como cero a la hora de realizar el sumatorio de los consumos. Esto va a producirse durante invierno para todos los locales a climatizar exceptuando el hall, como puede observarse en la figura 38.

También es posible observar en los resultados que durante la estación estival la reducción del consumo de la instalación gracias al recuperador es poco notoria, además de repercutir de forma similar en todos los locales. Por el contrario, y por el hecho mentado de que la carga propia de la mayoría de los locales de la planta de oficinas será favorable en invierno y cualquier tipo de refrigeración del local se podrá lograr por mero enfriamiento gratuito por ventilación con aire exterior filtrado, el consumo del equipo en el segundo caso durante esta estación será mucho menor al anularse en casi todos los locales; no siendo especialmente significativa por el contrario en el caso del hall, cuyas cargas internas son considerablemente menores.

5. Conclusiones

El incremento de la calidad del aire y del confort térmico demandados en los locales acondicionados provoca incrementar los consumos energéticos destinados a este fin.

Por otra parte, el impacto medioambiental por el consumo de energía, la reducción de los recursos energéticos disponibles y su incremento de precio, hacen que sea necesario abordar medidas que permitan mantener un adecuado nivel de calidad de ambiente interior sin penalizar el consumo energético de las instalaciones.

Dentro de este contexto, para las instalaciones de climatización todo aire, se abordan en este capítulo dos tecnologías que permiten reducir el consumo en la adecuación higrotérmica de los locales: los recuperadores de energía y los sistemas free-cooling.

La utilización de los diferentes recuperadores debe obedecer al tipo de climatología considerada, siendo más favorable la recuperación entálpica en aquellos climas donde la humedad forma parte importante del consumo energético de los edificios.

En las climatologías secas, la recuperación sensible será suficiente para asegurar un ahorro de energía adecuado.

Finalmente, la utilización de la recuperación de energía reduce el consumo energético en la adecuación higrotérmica de los locales, pero en instalaciones pequeñas, donde el ahorro de energía es reducido, es muy importante realizar un análisis de rentabilidad con la inversión y el ahorro económico para poder determinar el plazo de recuperación de la inversión.

Los sistemas de enfriamiento por free-cooling, se utilizan cuando las condiciones del aire exterior son más

favorables que las del aire viciado procedente de los locales.

Existen diferentes maneras de utilizar la tecnología free-cooling, siendo la más extendida y más sencilla la utilización directa del aire exterior cuando su temperatura lo permita. La otra alternativa es mediante una torre de enfriamiento que proporcione agua fría a una batería, donde se enfriará el aire de ventilación.

El control de los sistemas free-cooling, se puede realizar teniendo en cuenta sólo la temperatura de las corrientes de aire que intervienen en el proceso, o analizando sus entalpías.

En cuanto al control por entalpía del aire, aunque reduce más el consumo de energía en la instalación, su mayor complejidad en el sistema de control, la necesidad de utilizar sondas de humedad y finalmente el requerir procesos de enfriamiento adiabático del aire, hace que las instalaciones resultantes sean menos habituales que aquellas donde se realiza un control del sistema free-cooling por temperatura.

Glosario

Aire de expulsión: aire exterior aportado a los locales para mantener una adecuada calidad del aire interior.
Aire de impulsión: aire impulsado al local desde la Unidad de Tratamiento de Aire (UTA).
Aire de recirculación: aire procedente del local, que se recircula mezclado con el aire de ventilación.
Aire de ventilación o exterior: aire exterior aportado a los locales para mantener una adecuada calidad del aire interior.
Batería: intercambiador de calor consistente en un conjunto de tubos de cobre aleteados con placas de aluminio, que permite el intercambio de calor entre un fluido agua o refrigerante en cambio de fase y el aire.
Enfriamiento evaporativo: conversión de calor sensible (cambio de temperatura), en calor latente (cambio de humedad específica)
Entalpía: contenido energético del aire.
Entalpía específica: contenido energético de un kilogramo de aire seco.
Free-Cooling: enfriamiento gratuito aportado al local aprovechando las condiciones energéticas favorables del ambiente exterior.
Humedad específica: gramos de vapor de agua contenidos en un kilo de aire seco.
Recuperador de energía: equipo que permite el traspaso de energía, latente o sensible, del aire expulsado al aire de ventilación.
UTA: Unidad de Tratamiento de Aire. Conjunto de elementos utilizados para calentar, enfriar, humidificar y/o deshumidificar el aire.

Bibliografía

[1] Ghiaus, C.; Allard, F. Potential for free-cooling by ventilation. Solar Energy, nº80 (pp.402–413), 2006.
[2] Adnot, J. et al. Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC) FINAL REPORT - APRIL 2003, Volumen 3. Paris, 2003.
[3] International Energy Agency – Energy Conservation in Buildings and Community Systems. Technical Synthesis Report - Annex 28: Low Energy Cooling. Coventry, U.K.: ESSU (ExCo Support Services Unit); 2000.
[4] Hughes, B.R.; Chaudhry, H.N.; Ghani, S.A. A review of sustainable cooling technologies in buildings. Revista: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Nº 15 (pp.: 3112- 3120). 2010.
[5] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). Guía técnica de ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización. Serie: "Ahorro y Eficiencia Energética en la Climatización", Guía nº 9. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Madrid, 2010.
[6] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y Ministerio de Vivienda de España, Real Decreto 1027/2007: Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios.
[7] Rey Martínez, F. J.; San José Alonso, J. F.; Velasco Gómez, E.; Álvarez-Guerra, Plasencia, M. A. "Recuperadores de energía en sistemas de climatización".DTIE 8.01. ATECYR. Madrid 1996.
[8] Rey Martínez, F. J.; Velasco Gómez, E. "Calidad de Ambientes Interiores". Thompson. Madrid. 2007.
[9] Rey Martínez, F. J.; Velasco Gómez, E. "Eficiencia energética en edificios". Thompson. Madrid. 2006.
[10] Ministerio de vivienda. "Código Técnico de la Edificación: Documento Básico HS Salubridad". 2007.

El Urbanismo Ecológico: su aplicación en el diseño de un Ecobarrio en Figueres

Ecological Urbanism: its implementation in the Design of an Eco-neighbourhood in Figueres

Salvador Rueda Palenzuela [a*]

[a] *Ecólogo urbano, fundador y director de la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. BCNecología, Barcelona*

Resumen

Un ecosistema, el urbano también, puede reconocerse y distinguirse de otros por el conjunto de restricciones al que se someten los elementos que interactúan en su seno. El urbanismo establece un conjunto de restricciones en el devenir del sistema urbano que se califica ecológico cuando las restricciones que se establecen lo hacen con el objeto de hacerlo intencionadamente más sostenible.

Palabras clave: Urbanismo, Ecológico, Sostenible, Indicadores, Certificación, Gobernanza

Abstract

Any ecosystem, like the city, can be recognized and distinguished from others by the set of restrictions that control their interacting elements. Likewise, urbanism provides a set of constraints on the evolution of an urban system that could be qualified as ecological when those restrictions are purposely aimed for sustainability.

Keywords: Urbanism, Ecological, Sustainable, Indicators, Certification, Governance

1. Introducción

El urbanismo nace, como concepto moderno, en Barcelona de la mano de Ildefonso Cerdá. Cerdá pretendía, y lo consigue con el desarrollo del Ensanche, resolver las disfunciones y retos que la sociedad de mediados del siglo XIX tenía y que en síntesis, se centraban en la higiene y la salubridad; la movilidad, donde cada modo de transporte tuviera su red específica, un espacio suficiente para hacer frente a los retos de la nueva era industrial y la continuidad en el movimiento; la equidad territorial con una propuesta de reparcelación equilibrada y una disposición formal de la edificación y del viario isomorfo y sin privilegios; la integración de rentas en el mismo edificio y el equilibrio relación-aislamiento (construido-verde) que no es más que el equilibrio entre funcionamiento urbano y descompresión urbana. El conjunto de propuestas quedarán plasmadas en un plano de dos dimensiones y en un compendio normativo.

Los urbanistas que lo han seguido, hasta hoy, no han modificado, en sustancia, los principios básicos de Cerdá, si acaso los han adaptado a los cambios (por ejemplo, la aparición del automóvil) y los han ampliado con los principios funcionalistas, separando los usos y las funciones urbanas, prescindiendo de la mezcla e integración de rentas en el propio edificio o en áreas adyacentes, etc.

La pregunta es si el urbanismo responde a los retos actuales y a las disfunciones que están relacionadas con estos. Claramente, no. La energía, el agua, los flujos materiales, la explosión de la distribución urbana, el uso masivo del vehículo privado, las telecomunicaciones, etc. son, entre otras, variables que atienden a los retos de la sociedad actual y que no podían ser ni siquiera imaginados por la sociedad del siglo XIX. El caso es que el urbanismo

* info@bcnecologia.net

Citar como: Rueda, S. (2012). El urbanismo ecológico: su aplicación en el diseño de un ecobarrio en Figueres. En R. Hernández_Minguillón, O. Irulegi, M. Aranjuelo_Fernández-Miranda (Eds.), *Arquitectura Ecoeficiente* (Tomo I, pp. 295 - 325). San Sebastián, España. Servicio Editorial de la UPV/ EHU

actual, anclado en un urbanismo que bebe del funcionalismo (discutible hasta en su raíz epistemológica, puesto que separa lo que es consustancial a la idea de ciudad: la reunión de complementarios), tampoco es capaz de abordar las variables que, a distintas escalas, es urgente tener en cuenta.

Se impone un nuevo urbanismo, uno que se acomode a una ciudad más sostenible y a una ciudad que, a su vez, dé salida a la estrategia para competir basada en la información, es decir, que atienda a las premisas de la sociedad del conocimiento de un modo más eficiente.

Este nuevo urbanismo establece un conjunto de restricciones en el devenir del sistema urbano que se califica de ecológico cuando las restricciones que se establecen lo hacen con el objeto de hacerlo intencionadamente más sostenible.

Los dos restrictores principales son, por una parte, la función guía de la sostenibilidad urbana E/nH; una función de eficiencia que nos dice cuánta energía necesitamos para mantener una determinada organización urbana y que atiende al principio ecológico de maximizar la entropía en términos de información y, por la otra, la habitabilidad urbana que se descomponen los siguientes ámbitos: espacio público, edificación, equipamientos, biodiversidad y cohesión social.

El modelo urbano que mejor atiende a los restrictores principales del Urbanismo Ecológico, es el modelo de ciudad compacta, compleja, eficiente en el uso de los recursos y cohesionada socialmente. Estos cuatro ejes abrazan los principios de la sostenibilidad ambiental, social y económica y pueden parametrizarse con un paquete de unos 50 indicadores (restrictores secundarios íntimamente relacionados, todos ellos, con los restrictores principales). El resultado del cálculo nos da idea del grado de acomodación de la propuesta analizada al modelo de ciudad más sostenible indicado, constituyendo un verdadero certificado de urbanismo con criterios de sostenibilidad.

Formalmente, el urbanismo ecológico propone dibujar tres planos (y no uno como ahora), uno en superficie, otro del subsuelo y otro de subsuelo y otro en altura. Es un urbanismo de tres niveles religados. Propone también, planificar la funcionalidad de usos del espacio público a partir de una nueva célula urbana: la supermanzana.

Los objetivos que se establecen en el urbanismo ecológico no pueden obtenerse con el actual panorama organizativo y en la mayoría de los casos, también, normativo y económico. Por ello, se proponen nuevas fórmulas de gobernanza participadas: la modificación de la normativa y substituir la actual entrada de ingresos por la vía de las plusvalías de urbanización por otras relacionadas con el desarrollo del modelo de ciudad más sostenible en la era de la información y del conocimiento.

2. Marco teórico del Urbanismo Ecológico [1]

Independientemente de su dimensión, una ciudad, un barrio, un edificio o una casa son ecosistemas. Un sistema es un conjunto de elementos físico-químicos que interaccionan. Si entre los elementos hay organismos biológicos, al sistema lo llamamos ecosistema.

Pero lo que es importante, porque permite distinguir un sistema de otro, es el conjunto de restricciones que se imponen en el comportamiento potencial de los elementos relacionados. Por ejemplo, si escogemos como ecosistema una conferencia, los miembros participantes tienen infinidad de comportamientos potenciales que no usan (que están restringidos): podrían comer y la sala se convertiría en un comedor; podrían acostarse y se convertirá en un dormitorio; podrían bailar y cantar y la sala se convertiría en una discoteca..., ahora bien, del conjunto de comportamientos potenciales sólo hacen uso de aquellos que les hacen estar sentados, escuchando y, si acaso, tomando notas. Alguien habla y los demás escuchan. La restricción de comportamientos permite distinguir aquellos que nos hacen reconocer que el sistema es una conferencia, una clase, un seminario, etc. Al ecosistema le tenemos que añadir los otros elementos físicos que caracterizan el espacio, donde si necesitamos poca luz tendremos mecanismos para oscurecer la sala o si tenemos calor tendremos otros dispositivos para reducir la temperatura, etc.

El caso de la conferencia lo podríamos extender, por ejemplo, a una ciudad o al sistema de movilidad y reconoceremos los mismos mecanismos. El sistema de movilidad cuenta con más de 500 restricciones incluidas en el código de circulación. El conjunto de normas hace posible la funcionalidad urbana y evita, entre otros, que los vehículos choquen en los cruces, que los peatones cuenten con los elementos mínimos de seguridad, etc.

Si todos los desarrollos urbanos son ecosistemas, ¿cómo distinguir el Urbanismo Ecológico de aquel que no lo es? ¿Cuáles son las razones para calificar a un nuevo desarrollo como "ecológico"? Pues, como no podría ser de otra forma, por el sistema de restricciones (indicadores y condicionantes) y sus características.

2.1. El contexto

El primer conjunto de restricciones del Urbanismo Ecológico viene determinado por el contexto, hasta el punto de que a veces es mejor no intervenir. En otras ocasiones, la actuación será aconsejable porque con ella podremos regenerar algún ecosistema o parte de él. En cualquier caso, la propuesta de planeamiento deberá evaluar el impacto y las modificaciones que provoca y, en su caso, renunciar o acomodar la propuesta para reducir el impacto al mínimo posible.

La idea de sistema es omnicomprensiva. De hecho, "fuera" de los sistemas no hay nada. Esta amplitud, que de alguna manera se podría interpretar como una debilidad es, a la vez, su fuerza, pues obliga a aproximaciones holísticas (sistémicas) tanto del análisis como de la intervención. Ecológicamente, abordar la transformación de un determinado territorio (sistema) obliga a hacerlo teniendo en cuenta el medio (sistema más amplio) desde todas las vertientes: ambiental, económica y social. La solución adoptada no puede crear disfunciones en el contexto ni en

las variables secundarias que lo acompañan.

Las componentes del contexto son tan amplias como la propia realidad: paisajística, patrimonial, identitaria, geográfica, metabólica, sobre la biodiversidad, etc. La escala del contexto tiene la geometría de cada variable según sus características. Viene a ser como las cajitas de las muñecas rusas donde, en cada caso, el tamaño de la muñeca dependerá de las peculiaridades de la variable que guarda. La contaminación, por ejemplo, puede tener un impacto eminentemente local (material particulado), regional (SO2, COV, etc.) o global (gases de efecto invernadero).

Cualquier intervención sobre el territorio emitirá más o menos cantidades de estos contaminantes por lo que el contexto, en este caso, tendrá todas las escalas y deberán tenerse en cuenta todas ellas.

En la intervención urbanística podemos distinguir dos grandes conjuntos de restricciones, uno relacionado con la eficiencia del sistema y otro relacionado con la habitabilidad. Estos dos conjuntos comprenden la mayor parte de los condicionantes que más adelante se exponen.

2.2. La eficiencia del sistema urbano

En la naturaleza, la permanencia en el tiempo de los sistemas complejos: organismos y ecosistemas, está ligada a un principio de eficiencia donde la organización del sistema se mantiene y, a veces, se hace más compleja con un consumo de recursos que podría llegar a reducirse. El ejemplo más claro lo tenemos en la propia evolución de los organismos vivos donde, el sistema más complejo que conocemos, la especie humana (una de los recién llegadas), cuenta con una potencia energética instalada equivalente al de una bombilla de 150 W. Todo lo que hacemos: trabajar, estudiar, movernos, hacer el amor, etc. lo hacemos con una energía mínima si la comparamos con cualquiera de los artefactos creados por el hombre. Por ejemplo, un coche tiene una potencia instalada, sólo para moverse, entre 700 y 1000 veces mayor. En los ecosistemas el principio también se cumple[1]. “Maximizar la entropía en términos de información" es la expresión de la ecología académica del principio de eficiencia antes expuesto. En los sistemas urbanos la ecuación de la eficiencia la podemos expresar con la siguiente razón que, en el tiempo, debería tener valores cada vez menores:

$$\frac{\text{RECURSOS}}{\text{ORGANIZACIÓN URBANA}}$$

tiempo →

Este cociente lo podemos convertir en una ecuación sintética, que se configura como la función guía de la sostenibilidad urbana [2]:

$$\frac{E}{nH}$$

Donde *E* es el consumo de energía (como síntesis del consumo de recursos), *n* es el número de personas jurídicas urbanas (actividades económicas, instituciones, equipamientos y asociaciones) y *H* es el valor de la diversidad de personas jurídicas, también llamada complejidad urbana (información organizada). En los sistemas urbanos actuales, también en la tendencia de producir ciudad, los valores en el tiempo de la función guía, en lugar de reducirse se hacen cada vez mayores.

$$\frac{E}{nH} \; ; \; \frac{E}{nH} \; ; \; \frac{E}{nH}$$

tiempo →

Proceso hacia la insostenibilidad urbana

El incremento de la tasa de energía es significativamente mayor que el incremento de la tasa de organización[2]. Esto es así porque la lógica económica basa su estrategia para competir entre territorios en el consumo de recursos. De hecho, un territorio que se organiza mejor para consumir más recursos en la etapa siguiente, cobra ventaja competitiva.

En el Urbanismo Ecológico, la función guía se minimiza, haciendo que los recursos que necesitamos para mantener o hacer más compleja la organización urbana sean cada vez menores o, al menos, que la tasa de incremento del consumo de recursos sea proporcionalmente menor que la tasa de incremento de organización urbana obtenida.

$$\frac{E}{nH} \; ; \; \frac{E}{nH} \; ; \; \frac{E}{nH}$$

tiempo →

Proceso hacia la sostenibilidad urbana

Reducir los valores de la ecuación supone aumentar la estabilidad del sistema[3], al contrario de la tendencia actual, ya que las incertidumbres (las que hacen que los valores de la función guía aumenten) y la inestabilidad actuales aumentan: cambio climático, agotamiento de recursos, dependencia energética y de materiales, reducción de la biodiversidad, movimientos masivos de población por causas ambientales, etc., vienen de la mano de una lógica económica y de poder que deslocaliza los flujos metabólicos, hace un uso masivo de recursos y de energía exosomática no renovable, sobreexplota muchos de los sistemas de soporte, se expande sin límites (globalización) haciendo que los sistemas explotados y los sistemas urbanos que dependen sean claramente insostenibles. Los sistemas urbanos que en la medida de sus posibilidades

[1] En un bosque quemado la complejidad (la biodiversidad) es muy reducida por el efecto del incendio. La incidencia de la energía solar es constante. A medida que pasa el tiempo, la superficie del bosque quemado se irá colonizando de organismos que vivirán de la energía solar incidente. La complejidad (H) irá aumentando sin que lo haga la energía.

[2] En los sistemas urbanos, aumentar la organización significa incrementar el número de personas jurídicas y su diversidad.

[3] La estabilidad de un sistema es la capacidad que éste tiene para recobrar una condición perdida debido a una perturbación.

busquen la autosuficiencia y el autoabastecimiento de energía, agua, materiales y alimentos a escala local, sin sobreexplotar los sistemas de soporte, reducirán las incertidumbres y, por el contrario, aumentarán su capacidad de anticipación y de resiliencia.

Si, además, estos sistemas urbanos reducen el valor de la función guía, es decir, reducen el consumo de recursos, manteniendo o incluso aumentando su complejidad organizada, entonces el proceso de cambio hacia el futuro aumenta en estabilidad y se hace más sostenible.

En el Urbanismo Ecológico la competitividad entre territorios no puede estar basada en el consumo de recursos, sino que debe apoyarse en una estrategia basada en la información y el conocimiento.

Desvincular el crecimiento económico de los flujos metabólicos parece que es básico para aumentar, como veremos más adelante, nuestra capacidad de anticipación y está en línea con la desmaterialización de la economía.

La información en los sistemas urbanos se condensa en sus organizaciones, es decir, en la n y la H. La estrategia para competir basada en la información es exponencial, pues tiene una componente multiplicativa[4]. Aumentar una unidad de información organizada H supone doblar el valor de la diversidad urbana. Por el contrario, la estrategia actual para competir basada en el consumo de recursos es aditiva. Las energías se suman, la información organizada se multiplica.

Veamos de manera resumida qué supone y qué consecuencias tiene reducir la E y aumentar la n y la H de la función guía:

Reducir la **E** supone, en principio:	Aumentar la **n** y la **H** supone, en principio:
Reducir la estrategia para competir entre territorios basada en el consumo de recursos, desmaterializando la economía y desvinculando el crecimiento económico del consumo.	Desarrollar la estrategia para competir basada en la información y el conocimiento. Uno de los dos retos principales de este siglo XXI[10].
Reducir el consumo de recursos.	Aumentar la diversidad y la mixtura de usos y funciones urbanas. Esta es una característica clave para aumentar la resiliencia y la estabilidad económica, entendiendo que la estabilidad depende del grado de complejidad de su red de relaciones y ésta de la diversidad del sistema urbano.
Aumentar la capacidad de anticipación y reducir las incertidumbres que supone la dependencia de los combustibles fósiles, por escasos y/o por los precios incrementados que se espera tengan por su extracción.	Aumentar los puestos de trabajo para ciudadanos de diferente nivel de instrucción y edad. Esto permite aumentar la estabilidad social.
Reducir las emisiones de efecto invernadero.	Aumentar la autocontención[11] y la autosuficiencia[12].
Aumentar la dependencia de los recursos locales.	Aumentar el capital económico y el capital social.
Acercarse al autoabastecimiento de energía con recursos renovables y locales.	Aumentar el número de actividades densas en conomiento y actividades TIC.
Acercarse a la calificación de territorio neutro en carbono.	Aumentar las actividades productivas con valor añadido.
Cambiar el modelo de movilidad.	Aumentar las redes de relaciones entre complementarios y crear, al mismo tiempo, clusters de actividades.
Reducir las emisiones contaminantes.	Aumentar la creatividad, la investigación y la innovación.
Reducir la superficie expuesta a ruidos inadmisibles (el ruido es una manifestación de la disipación energética).	Hacer ciudad, entendiendo que la ciudad la hacen el espacio público y la reunión de personas jurídicas complementarias.
Apostar más por la rehabilitación y renovación urbanas y menos por la construcción de nuevos desarrollos.	Crear nuevas áreas de centralidad y hacer más maduras las existentes.
Ahorrar y hacer eficientes los procesos de construcción y uso de los edificios.	Aumentar la proximidad de usos y funciones y la accesibilidad a los servicios básicos y a los equipamientos con transportes alternativos al coche.
Reducción del sellado e impermeabilización de suelo.	Aumentar el número de ciudadanos de toda condición ocupando el espacio público.
Ahorrar y hacer eficientes los servicios públicos y privados.	Alargar la vida urbana, no sólo en horas diurnas, también nocturnas.
La participación de los ciudadanos en la intención de reducir el consumo de recursos. Ya sea desde la gestación del nuevo desarrollo, la rehabilitación (en su caso), como del uso de los recursos (éste sí es obligatorio) una vez está en funcionamiento el nuevo sistema o el sistema rehabilitado.	Aumentar la seguridad ciudadana.
	Aumentar el número de asociaciones componentes de la sociedad civil
	Crear redes de autoayuda que acompañan el crecimiento de la sociedad civil.

Fig.1. Resumen de lo que supone y las consecuencias que tiene reducir la E y aumentar la n y la H.

[4] Dentro de la estrategia de aumentar la complejidad de los ecosistemas urbanos, hay que tener en cuenta que la adición de una cantidad similar de información a dos sistemas diferentes enriquece más a aquellos sistemas que, para empezar, ya tenían más información.

Aumentar la eficiencia del sistema urbano es la condición necesaria para la formulación del Urbanismo Ecológico, la condición suficiente se logra desarrollando escenarios de "máxima" habitabilidad urbana para las personas y los organismos que allí viven.

2.3. La Habitabilidad Urbana

La habitabilidad urbana (el segundo restrictor principal) es un constructo que está ligado a la optimización de las condiciones de la vida urbana de personas y organismos vivos y a la capacidad de relación entre ellos y el medio en el que se desarrollan. Confort e interacción son dos aspectos inseparables en el Urbanismo Ecológico. El primero hace referencia a las características del lugar: espacio público, residencia, equipamientos, etc., y el segundo a la condición social de los humanos y de buena parte de los seres vivos (sustancial también para los sistemas urbanos), y hace referencia a la cohesión social y a la diversidad biológica.

2.3.1. Habitabilidad y espacio público

El espacio público, junto con la reunión de personas jurídicas complementarias (*H*) en un territorio limitado, son los dos elementos principales que constituyen la esencia de la ciudad. Sin ellos la ciudad no existe como tal.

En la ciudad mediterránea, el lugar de reunión y de encuentro es el espacio público. Es el lugar simbólico en que ciudad, democracia y política se encuentran. El espacio público marca los límites de la idea de ciudad, sin él puede hablarse de urbanización, pero difícilmente de ciudad [3]. Hacer ciudad y no urbanización es un objetivo básico del Urbanismo Ecológico.

El espacio público, "la casa de todos", le da al ciudadano su carta de naturaleza. El ciudadano lo es cuando puede hacer uso del conjunto de funciones potenciales del espacio público sin restricciones: juego, fiesta, intercambio económico, estancia, deporte, etc. Cuando el espacio público se destina mayoritariamente a la movilidad motorizada (que es una de las funciones del espacio público), el ciudadano deja de serlo para convertirse en "peatón" (un modo de transporte).

En este ámbito el grupo de restricciones relacionados y expuestos más adelante, se dirigen a conseguir la "máxima" habitabilidad en el espacio público haciendo, entre otras, que la mayor parte del mismo tenga la totalidad de usos y funciones potenciales que le son propias. Esto sólo es posible cuando se dan las condiciones adecuadas de confort, de accesibilidad, de seguridad, etc. [4]

2.3.2. Habitabilidad, equipamientos y servicios básicos

Los equipamientos proporcionan parte de los servicios básicos urbanos. Sus características (dimensiones, funciones, etc.) están relacionadas y se acomodan a las peculiaridades del tejido urbano y a la población que sirve. Para cada desarrollo urbano, la existencia de los equipamientos que le corresponden y su accesibilidad a pie serán determinantes para fijar el grado de habitabilidad en este ámbito. Al igual que la habitabilidad en la vivienda está relacionada con la existencia de los servicios básicos: sanitarios, cocina, etc., los nuevos desarrollos deben contar con los equipamientos y los servicios básicos a nivel urbano para obtener la habitabilidad que le corresponde [5].

2.3.3. Habitabilidad y edificación

Es la edificación (residencial) donde principalmente se ha desarrollado el concepto de habitabilidad, tradicionalmente relacionada con el confort y la seguridad. Con el Código Técnico de la Edificación y el Decreto de Habitabilidad en Cataluña [6] se ha dado un paso adelante para obtenerla con un mejor comportamiento energético y de accesibilidad física de los edificios. Sin embargo, el Urbanismo Ecológico da un paso más en la eficiencia energética y en la cohesión social. En este sentido, los servicios y el confort de la vivienda y/o edificio se proveerán cumpliendo con el principio de eficiencia urbana (*E/H*), que los obtiene (los servicios y el confort) con un consumo de recursos mínimo y renovables. La orientación, la anchura del edificio y la ventilación cruzada, la captación y uso de aguas marginales, la captación solar, etc. son aspectos que vinculan el diseño del edificio al principio de eficiencia.

Respecto a la cohesión social, el Urbanismo Ecológico considera el edificio como primer escalón para conseguir la mezcla social y la mixticidad de usos.

2.3.4. Habitabilidad y cohesión social

La convivencia, como expresión de la habitabilidad social, está muy relacionada con la confluencia en espacios relativamente reducidos de personas con condiciones diferentes. La mezcla de rentas, de edades, de etnias o de culturas en el "mismo" espacio urbano, suele proporcionar las condiciones adecuadas para vivir juntos. La diversidad social, en proporciones adecuadas, potencia la estabilidad y la complejidad de la red de relaciones. La tendencia actual de producir ciudad es, en sentido contrario, la segregación social en el territorio.

2.3.5. Habitabilidad y biodiversidad

Los parques, los jardines, los huertos urbanos, etc., forman parte de las áreas verdes vegetadas que conforman el grueso principal de la biodiversidad urbana. Una de sus funciones es, una vez más, proporcionar habitabilidad a los ciudadanos. Otra está relacionada con crear las condiciones (habitabilidad) para que la vida prolifere y la biodiversidad crezca.

La integración de las cinco habitabilidades aquí expuestas conforman la habitabilidad urbana que es la "suma integrada" de los requerimientos para obtener las mejores condiciones para vivir en la ciudad.

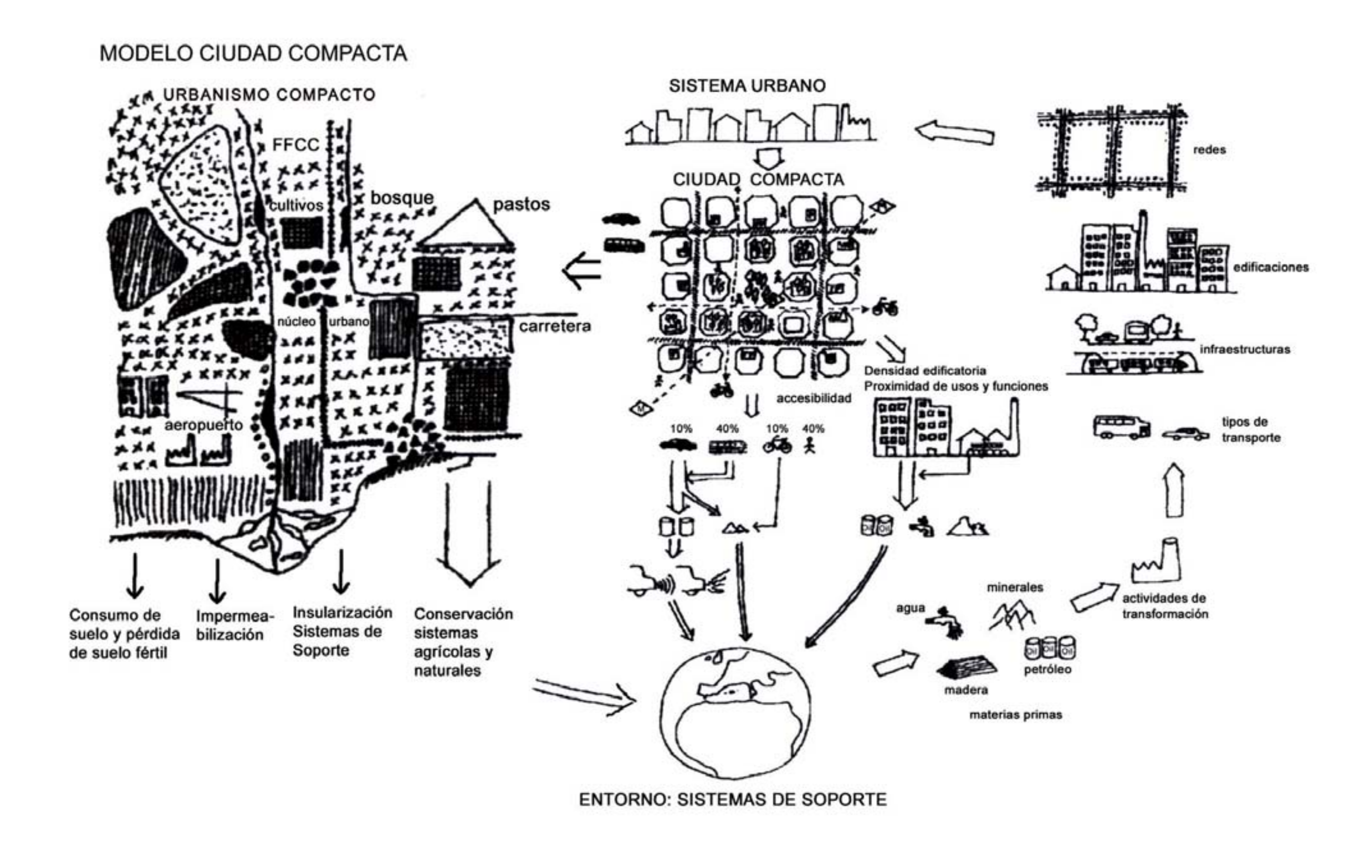


Fig. 2. Fuente: Rueda, S (1997) "Modelos e Indicadores para Ciudades Sostenibles" Ed. Agencia Europea de Medio Ambiente.

3. El modelo de ciudad más sostenible

Tras el análisis comparado de diversos sistemas urbanos, el modelo urbano que mejor se ajusta al principio de eficiencia urbana y habitabilidad urbana es la ciudad compacta en su morfología, compleja en su organización, eficiente metabólicamente y cohesionada socialmente [7]. El Urbanismo Ecológico adopta este modelo tanto en la transformación de tejidos existentes como en el diseño de nuevos desarrollos urbanos.

El modelo urbano más sostenible recoge un enfoque sistémico de la relación ciudad-medio y los elementos que lo componen. Éste se estructura en siete ámbitos que, a su vez, se insertan dentro de los cuatro objetivos básicos del urbanismo sostenible:

- la compacidad,
- la complejidad,
- la eficiencia,
- la estabilidad social.

3.1. La compacidad urbana

La compacidad es el eje que atiende a la realidad física del territorio y, por tanto, a las soluciones formales adoptadas: la densidad edificatoria, la distribución de usos espaciales, el porcentaje de espacio verde o de viario. Determina la proximidad entre los usos y funciones urbanas. A este eje, lo acompaña el modelo de movilidad y espacio público y el modelo de ordenación del territorio derivado.

El espacio público es el elemento estructural de un modelo de ciudad más sostenible. Es el espacio de convivencia ciudadana y forma, conjuntamente con la red de equipamientos y espacios verdes y de estancia, los ejes principales de la vida social y de relación. La calidad del espacio no es sólo un indicador relacionado con el concepto de compacidad, sino que al mismo tiempo es indicador de estabilidad.

3.2. La complejidad urbana

La complejidad atiende a la organización urbana, al grado de mixticidad de usos y funciones implantadas en un determinado territorio. La complejidad urbana es el reflejo de las interacciones que se establecen en la ciudad entre los entes organizados, también llamados personas jurídicas: actividades económicas, asociaciones, equipamientos e instituciones.

La complejidad está ligada a una cierta mezcla de orden y desorden, mezcla íntima que, en los sistemas urbanos, se puede analizar en parte, haciendo uso del concepto de diversidad. Los organismos vivos y sobre todo el hombre y

sus organizaciones, son portadores de información y atesoran, de forma dinámica en el tiempo, características que nos indican el grado de acumulación de información y también de la capacidad para influir significativamente en el presente y controlar el futuro.

Las estrategias urbanas que permiten incrementar el índice de diversidad son aquellas que buscan el equilibrio entre usos y funciones urbanas a partir de la definición de los condicionantes urbanísticos. Se trata, entre otros objetivos, de acercar a las personas a los servicios y a los puestos de trabajo, entendiendo que con ello se reduce, desde el punto de vista de la energía, el consumo de esta. Indicadores como los de autocontención laboral y autosuficiencia laboral permiten conocer el grado de proximidad entre residencia y trabajo.

En cortes temporales sucesivos, los indicadores de complejidad (diversidad) muestran la madurez del tejido urbano y la riqueza del capital económico, del capital social y del capital biológico.

3.3. La eficiencia metabólica

La eficiencia es el concepto relacionado con el metabolismo urbano, es decir, con los flujos de materiales, agua y energía, que constituyen el soporte de cualquier sistema urbano para mantener su organización y evitar ser contaminado. La gestión de los recursos naturales debe alcanzar la máxima eficiencia en su uso con la mínima perturbación de los ecosistemas.

En el ámbito de la energía, el Urbanismo Ecológico plantea que los nuevos barrios superen su condición de meros consumidores de energía, para convertirse en generadores de energías renovables que tiendan a la autosuficiencia. La generación se combina con medidas de ahorro y eficiencia.

Fundamental resulta en el metabolismo urbano la gestión integrada de los recursos hídricos y de los residuos que en la ciudad se producen.

En una gestión integrada, tanto a escala local como a escala de cuenca se busca la máxima autosuficiencia hídrica que combine también las medidas de captación con las medidas de ahorro y eficiencia. Es imprescindible vincular el desarrollo urbano al ciclo del agua en su expresión local: captación de agua de lluvia y reutilización de las aguas marginales.

En el ámbito de los materiales se busca la máxima autosuficiencia del sistema con recursos locales. Para ello, se cuenta con los recursos naturales del lugar y con la reutilización de parte de los flujos residuales. El modelo de gestión de residuos diseñado con criterios de sostenibilidad tenderá a conseguir el máximo control local de la gestión de recursos, para aproximarse al cierre del ciclo de los materiales y, siempre que sea factible, incorporar la máxima autosuficiencia (autocompostaje y reutilización) reduciendo, a su vez, el impacto contaminante.

Se incluye en este ámbito la producción de alimentos con el objetivo de proporcionar la mayor parte de los alimentos consumidos en el sistema urbano.

3.4. La cohesión social

La cohesión social atiende a las personas y las relaciones sociales en el sistema urbano.

La mezcla social (de culturas, edades, rentas, profesiones) tiene un efecto estabilizador sobre el sistema urbano, ya que supone un equilibrio entre los diferentes actores de la ciudad. El análisis de la diversidad nos muestra quién ocupa el espacio y la probabilidad de intercambios y relaciones entre los componentes con información dentro de la ciudad. En cambio, la segregación social que se produce en ciertas zonas de las ciudades crea problemas de inestabilidad como son la inseguridad o la marginación.

El éxito en la planificación permitirá que el espacio público sea ocupado por personas de diferente condición, facilitando la convivencia y el establecimiento de interacciones entre ellas, posibilitando de esta manera la disminución del conflicto, lo que determina la estabilidad y madurez de un sistema.

La proximidad física entre equipamientos y viviendas, la mezcla de diferentes tipos de vivienda destinados a diferentes grupos sociales, la integración de barrios marginados a partir de la ubicación estratégica de elementos atractores, la priorización de las conexiones para peatones o la accesibilidad de todo el espacio público para personas con movilidad reducida, son elementos clave para no excluir a ningún grupo social y garantizar las necesidades básicas de vivienda, trabajo, educación, cultura, etc.

4. Validación del Urbanismo Ecológico: el sistema de indicadores

El sistema de indicadores que en este marco teórico se expone de manera resumida, constituye el sistema amplio de restrictores que definen el Urbanismo Ecológico.

Con la aplicación de los indicadores y condicionantes del Urbanismo Ecológico se busca ajustar el planeamiento al modelo de ciudad compacta, compleja, eficiente y cohesionada socialmente, cumpliendo al mismo tiempo, los principios de eficiencia y habitabilidad urbana. El conjunto de indicadores [8] se articula en siete grupos o ámbitos (Fig. 3):

1. Ocupación del suelo,
2. Espacio público,
3. Movilidad,
4. Diversidad de usos y funciones urbanas,
5. Biodiversidad,
6. Metabolismo, y
7. Cohesión social;

que a su vez se agrupan en cuatro ejes que son los definidores del modelo de ciudad: compacidad (1, 2 y 3); complejidad (4 y 5); eficiencia (6); cohesión social (7).



Fig. 3. Conjunto de indicadores.

El Urbanismo Ecológico valora las particularidades del contexto como una premisa básica de acercamiento al problema a tratar, por lo tanto la aplicación de los indicadores, lejos de ser mecánica, deberá contextualizarse y seleccionar los parámetros a aplicar. Con todo el listado exhaustivo servirá como referencia permanente a los diferentes planeamientos, aceptando que cada nueva experiencia pueda enriquecer y matizar este cuerpo teórico de referencia.

El conjunto de indicadores es de aplicación tanto en el planeamiento de nuevos desarrollos urbanos, como en la transformación de la ciudad consolidada. En ambos casos, a pesar de tratarse de contextos diferenciados, se persigue el mismo objetivo: lograr un modelo de ciudad compacta, compleja y más sostenible. Cabe señalar que los indicadores son de aplicación en los diferentes procesos de construcción de la ciudad, bien sea en fase de planeamiento, de urbanización, de construcción o de uso.

Todos los indicadores tienen una vinculación mayor o menor con los dos principales restrictores del Urbanismo Ecológico, la función guía de la sostenibilidad o la habitabilidad en un sentido amplio. Es por ello que los indicadores valoran, entre otros, los aspectos que atañen al consumo de recursos; los parámetros que se relacionan con la información organizada o los derivados de la habitabilidad.

4.1. Ámbito 0. El contexto

El Urbanismo Ecológico toma en consideración la idoneidad de los desarrollos urbanísticos en función de las características del emplazamiento y de las potencialidades en cuanto a la consecución de la habitabilidad urbana y de la eficiencia del sistema urbano.

Toda actuación sobre el suelo genera impactos e implica transformaciones en el medio natural, de carácter reversible, parcialmente reversible o irreversible. Por tanto, el contexto espacial y los elementos definidores del perfil ambiental pueden condicionar la viabilidad y coherencia de los objetivos del nuevo Urbanismo Ecológico. Es por ello que hay que tener cuenta una serie de condicionantes previos, de carácter obligatorio, que preserven los rasgos diferenciales del territorio y mitiguen los impactos generados del proceso urbanizador.

4.1.1. Ocupación del suelo

En primer lugar, se ordenarán los suelos que fomenten las estructuras urbanas compactas y polifuncionales, estableciendo como prioritarios los procesos que promuevan el reciclaje de tejidos urbanos existentes, la recuperación de suelos en desuso en el interior de los ámbitos urbanos o los procesos de redensificación de suelos urbanizables de carácter disperso. La intervención en áreas de expansión urbana de carácter residencial se lleva a cabo cuando se ordenan márgenes de tejidos urbanos o áreas de nueva centralidad, favoreciendo criterios de accesibilidad y atracción urbana.

En cuanto a las características físicas y naturales del emplazamiento, se valorará la compatibilidad de usos entre la ordenación estructural prevista y la capacidad de carga del territorio. Se delimita y se prohíbe el empleo en zonas sometidas a riesgos naturales o de vulnerabilidad. Se realiza el análisis de los riesgos naturales definidos en el artículo 9.2 del DL 1/2005 y estudio de la aptitud de otras propiedades del suelo: inundabilidad, incendios forestales, inestabilidad de laderas, erosión, salinidad, pedregosidad, pendiente, etc.

4.1.2. Recursos metabólicos locales

Otro aspecto importante en la fase previa de ordenación es la consideración de los recursos metabólicos implicados en la obtención de la habitabilidad y su relación con el medio físico inmediato. Los recursos hídricos, energéticos y de materiales empleados para la edificación deberían ser limitados en función de los recursos locales disponibles, asegurando su máximo aprovechamiento y la reducción al mínimo de su demanda, y así, asegurar la capacidad de soporte del medio.

Por tanto, los nuevos desarrollos urbanos se vincularán a la disponibilidad de recursos locales para garantizar porcentajes mínimos de autosuficiencia de los flujos metabólicos: se estimará el balance energético y el potencial de producción local de las fuentes de energías renovables, se estimará el balance hídrico de la zona teniendo en cuenta posibles reducciones derivadas del cambio climático, disponibilidades de las fuentes y aguas marginales y capacidad de recarga del sistema hídrico y, finalmente, se estimará el potencial de reutilización y

reciclaje de los recursos locales y de los residuos generados en el área de intervención.

4.1.3. Mitigación y adaptación al cambio climático

El nuevo Urbanismo Ecológico debe hacer frente al cambio climático a partir de medidas de mitigación y adaptación al mismo. Es importante tener en cuenta nuevos escenarios tendenciales de variabilidad climática a medio y largo plazo (inundaciones, precariedad hídrica, aumento de la temperatura) para poder anticiparse, por un lado, al surgimiento de nuevas demandas y requerimientos ligados a un nuevo régimen metabólico y por otra, para poder proyectar nuevos escenarios urbanos neutros en carbono: de mínima o nula emisividad de emisiones de CO_2 a la atmósfera.

4.1.4. Contaminación atmosférica

La asignación de usos también tendrá en cuenta la prevención y la corrección de las inmisiones y la capacidad del medio atmosférico para dispersar sus contaminantes.

Las condiciones acústicas, lumínicas y electromagnéticas del contexto han de hacer viable el confort de los futuros residentes, reduciendo la población expuesta a niveles no permitidos por la legislación. Se tendrán en cuenta los mapas de capacidad acústica y las zonas de sensibilidad acústica, las fuentes emisoras de ruido, la vulnerabilidad a la contaminación luminosa y las instalaciones de radiocomunicación y de transporte de energía eléctrica.

4.1.5. Paisaje y patrimonio natural y cultural

La asignación de usos del suelo y la edificación preservará e integrará la calidad del paisaje y los rasgos de identidad del territorio. Los nuevos desarrollos protegerán y pondrán en valor el patrimonio ecológico, cultural y paisajístico de las áreas de intervención, preservando su identidad.

Se garantizará la continuidad e integridad de los espacios agroforestales, los espacios de interés natural, los espacios libres urbanos, los corredores ecológicos y otras áreas estratégicas de conservación para conservar la biodiversidad territorial y la conectividad ecológica. Se incluirán todos aquellos espacios protegidos por la legislación de conservación de la naturaleza, los hábitats de interés comunitario, los hábitats de especies de interés comunitario, las zonas húmedas, los espacios litorales no urbanizados, etc.

Se requerirá una protección, ordenación y gestión del paisaje por su multiplicidad de valores culturales, simbólicos, estéticos, ecológicos, etc. El nuevo urbanismo incorpora las directrices y recomendaciones definidas en la Ley 8/2005, de 8 de junio, de protección, gestión y ordenación del paisaje de Cataluña y los catálogos de paisaje, herramientas de ordenación y gestión del paisaje desde la perspectiva del planeamiento territorial. También se incorporarán otros catálogos de bienes protegidos de interés nacional o local.

4.1.6. Población y hábitos de vida

De forma previa al proceso planificador es importante hacer una valoración de las características sociodemográficas de la población (grupos de edad, lugar de nacimiento, nivel de estudios, etc.) y de los estilos o hábitos de vida que pueden condicionar la planificación urbana: el modo de desplazamiento de la población para ir al trabajo, a comprar o a la escuela, los hábitos alimentarios y de compra, la distancia a los servicios públicos más cercanos, las formas de convivencia, los equipamientos e infraestructuras de la vivienda o los hábitos de ocio.

Los estilos o hábitos de vida son el conjunto de comportamientos o actitudes que desarrollan las personas y que tienen incidencia en la calidad de vida de la población, tanto a título individual como colectivo. Los nuevos desarrollos y los procesos de reciclaje urbano deben permitir orientar ciertos hábitos de vida -como por ejemplo el de la movilidad sostenible- a partir del diagnóstico de estos hábitos de la población y de la articulación de propuestas ajustadas a la realidad.

4.2. Ámbito 1. Ocupación del Suelo

4.2.1. Ocupación compacta

El modelo de ocupación del territorio del Urbanismo Ecológico se configura como un modelo de ocupación compacta con el fin de reducir el consumo de suelo y de buscar la máxima eficiencia en el uso de los recursos naturales y disminuir, así, la presión de los sistemas urbanos sobre los sistemas de soporte.

El Urbanismo Ecológico analiza e incorpora, de forma previa a la planificación urbana, aquellos condicionantes del entorno y normativos que rigen el ámbito de actuación con el objetivo de definir y organizar el modelo de gestión de nuevas planificaciones en barrios más sostenibles.

4.2.2. Integración y conectividad

Integración urbana de los nuevos desarrollos o procesos específicos de reciclaje urbano para crear flujos de comunicación continuos, complejos y eficientes con los espacios y barrios colindantes. El encaje territorial se adquiere con el entorno inmediato y con las diferentes escalas espaciales de interacción urbana: barrio, ciudad.

En principio, se descartan los nuevos desarrollos que no sean una continuación de la conurbación.

Se preservan los espacios del territorio esenciales para el mantenimiento de los ciclos naturales y se fomenta la creación de una matriz verde interconectada de elevada biodiversidad con una componente agrícola y ganadera a potenciar siempre que sea posible. Se estructura y jerarquiza la red de espacios libres según funcionalidad.

4.2.3. Densidad e intensidad edificatoria

Las tipologías edificatorias son primordialmente de vivienda colectiva con la intención de reunir, en un mismo espacio, suficiente masa crítica de población y, así, incitar intercambios y nuevas relaciones comunicativas entre personas, entes y actividades. Por otra parte, determinadas densidades de población permiten el desarrollo eficiente de funciones urbanas ligadas a la movilidad sostenible y a la dotación de servicios, tanto en el ámbito del transporte público y las infraestructuras ligadas a los flujos metabólicos, como de los equipamientos y servicios básicos.

La intensidad edificatoria se ajusta a valores mínimos de edificabilidad, derivados de un cociente que vincule el volumen edificado y la superficie urbana del área de actuación. El pretexto es un acercamiento de las distancias entre usos, espacios públicos, equipamientos y otras actividades para desarrollar patrones de proximidad de forma que los desplazamientos se realicen mayoritariamente a pie.

Se facilita la convivencia de diversos programas residenciales (viviendas familiares de varios tamaños), para acoger colectivos o necesidades específicas, con el fomento de tipologías flexibles y adaptables a diferentes formas de habitar.

Esta flexibilidad y adaptabilidad en la concepción de la vivienda se favorece mediante el otorgamiento de rangos de volumetría específica constructiva para cada manzana de forma que resulten estructuras extensibles y flexibles.

La volumetría edificatoria es sensible a las condiciones del entorno (orografía, alturas edificatorias, tipo de viales) y se orienta de forma que se maximicen criterios de eficiencia energética.

4.2.4. Indicadores de ocupación del suelo: principales objetivos

a. Densidad de viviendas

- Reunir en un mismo espacio suficiente población para incentivar intercambios y nuevas relaciones comunicativas entre personas, entes y actividades.
- Desarrollar con eficiencia aquellas funciones urbanas ligadas a la movilidad sostenible y la dotación de servicios tanto en el ámbito del transporte público y de las infraestructuras ligadas a los flujos metabólicos como de los equipamientos y servicios básicos.

b. Compacidad absoluta

- Favorecer un modelo de ocupación compacta del territorio para buscar la eficiencia en el uso de los recursos naturales y disminuir la presión de los sistemas urbanos sobre los sistemas de soporte.
- Crear tejidos compactos para acercar distancias entre usos, espacios públicos, equipamientos y otras actividades
- Desarrollar patrones de proximidad de forma que los desplazamientos se realicen mayoritariamente a pie.
- Potenciar las relaciones de vecindad entre residentes, visitantes y personas jurídicas.
- Aumentar la probabilidad de contacto, intercambio y comunicación entre los diversos agentes y elementos del sistema urbano.

4.3. Ámbito 2. Espacio público y habitabilidad

4.3.1. Calidad del espacio público

Uno de los principales retos del Urbanismo Ecológico es transformar el espacio público en un lugar mucho más habitable. Hoy en día, la mayor parte del espacio público está limitado por las funciones asociadas al vehículo privado. Esta realidad deriva en una planificación del espacio público poco flexible que hace mermar su calidad y, de rebote, la calidad de vida de los ciudadanos.

Los elementos que configuran un modelo de ciudad más habitable y sostenible no son estáticos sino que están vinculados a flujos de movilidad, a variables de confort, etc. El Urbanismo Ecológico se apoya en una metodología integrada para el cálculo del grado de habitabilidad urbana.

Los criterios de análisis del espacio público, y en general de los entornos urbanos con una visión más sostenible, requieren de un enfoque sistémico y una vinculación de la escala urbana con la escala humana.

El espacio público representa un termómetro vital del grado de convivencia colectiva. Su definición debe servir como hábitat de personas, y no de vehículos, para incentivar la interacción, el contacto, la convivencia y el bienestar.

El Urbanismo Ecológico reserva una dotación mínima de 10 m2 de espacio público de estancia por habitante (parques y jardines, calles peatonales, ramblas, plazas y aceras mayores de 5 m de ancho). El espacio público de estancia es aquel que, por sus características morfológicas y funcionales permite, en distinto grado, la interacción entre personas o la interacción de éstas con un espacio de calidad.

El Urbanismo Ecológico busca un equilibrio urbano entre los espacios dedicados a la funcionalidad y la organización urbana y los espacios orientados al ciudadano, a la tranquilidad y al contacto con el verde (espacios de estancia). Este equilibrio se plasma con el cociente entre el volumen construido y el espacio de estancia.

Con la implantación de Supermanzanas (ver ámbito de movilidad), el interior de éstas será de sección única, sin diferenciación entre calzada y acera. La sección única permite multiplicar los usos y funciones del espacio público de manera que en su seno cabe todo menos el vehículo de paso. Con las Supermanzanas los valores de equilibrio entre los espacios dedicados a la funcionalidad y a la organización (compresión) y el espacio dedicado al relax, la estancia y el contacto con la naturaleza (descompresión) están garantizados. En los tejidos consolidados muy comprimidos (con escaso espacio público de estancia), la implantación de Supermanzanas reequilibra la dicotomía

compresión-descompresión y aumenta significativamente la calidad urbana. Las ciudades que adopten un modelo de movilidad y espacio público basado en Supermanzanas desarrollarán, sin duda, el proyecto más importante de reciclaje urbano al que pueden optar y a costes relativamente reducidos.

Con la implantación del modelo de Supermanzanas "se cambia todo sin cambiar nada". Se libera el 70% del espacio de la calle para desarrollar el conjunto de usos y funciones urbanas, unos usos y funciones que dan al ciudadano (le devuelven, cuando hablamos de tejidos consolidados) su carta de naturaleza.

4.3.2. Habitabilidad urbana en el espacio público

El grado de habitabilidad urbana del espacio público se estima a partir de la evaluación de aquellas condiciones favorables para el bienestar fisiológico, físico y psicológico de las personas en el espacio público.

El espacio público es accesible. Los desplazamientos a pie se generan a través de recorridos donde la relación entre el espacio destinado a los peatones respecto al espacio del vehículo privado es mayor al 75%. Las anchuras mínimas de las aceras son de 2,5 m para garantizar el paso sin fricciones de una silla de ruedas a la vez que se procura que las pendientes no sobrepasen el 5%.

El espacio público es confortable desde el punto de vista de la calidad del aire, del confort acústico, lumínico y térmico. En lugares ventosos, se proyectan barreras para reducir el discomfort, al menos, en los espacios emblemáticos. La red de calles y espacios de relación, no sobrepasa los 40 µgr/m³ en superficie de dióxido de nitrógeno (NO_2) y de partículas en suspensión (PM10) y los 65 dBA de nivel sonoro equivalente durante el día y los 55 dBA durante la noche.

El diseño de calles, plazas y espacios de relación garantiza niveles lumínicos adecuados según tamaño y uso asociado sin producir contaminación lumínica. También se evita la creación de rincones que generen sensación de inseguridad.

La habitabilidad urbana incorpora las condiciones térmicas del espacio público a partir de la consideración del número de horas al día de confort térmico. Se procura una elección apropiada de materiales y vegetación para conseguir condiciones térmicas satisfactorias: más del 50% de las horas de uso del espacio público (entre las 8:00 y las 22:00 horas, en verano) con niveles que oscilan entre los 50 y -50 W/m².

El espacio público es atractivo por inclusión de actividades de proximidad mezcladas con actividades de radios de atracción mayores. Para nuevos desarrollos, el Urbanismo Ecológico reserva espacios para la inclusión de usos comerciales y de terciario en los principales ejes de conexión y áreas de atracción.

La continuidad de actividad en planta baja permite una mayor presencia de personas en la calle lo que contribuye a la creación de espacios más seguros, reduciendo la desertización de las calles y la sensación de inseguridad. Como criterio general, en los principales ejes comerciales, la densidad mínima de actividades en planta baja es de 20 locales por cada 100 m.

Por último, la presencia de verde es fundamental para aumentar el atractivo del espacio público. El campo visual de la calle, desde el centro de la misma, debería contar, como mínimo, con un 10% de verde.

4.3.3. Indicadores de Espacio Público y Habitabilidad: Principales Objetivos

a. Compacidad corregida

- Buscar el equilibrio entre los espacios construidos y los espacios libres y de relación para un área determinada.
- Establecer una proporción adecuada entre los espacios relacionados con la actividad y la organización del sistema urbano (el espacio construido) y aquellos espacios descompresores de la tensión urbana orientados a satisfacer las necesidades de recreo, estancia al aire libre y de relación (espacio de estancia).

b. Espacio de estancia por habitante

- Garantizar una reserva mínima de espacios de estancia por habitante. La cobertura de espacios de estancia en las ciudades es de gran importancia ya que afecta de manera muy directa a la calidad de vida de sus ciudadanos. Los paseos, las ramblas, los parques y las plazas entre otros, juegan un papel fundamental tanto en el medio ambiente y la biodiversidad de la ciudad como por su funcionalidad como espacios de relación, de esparcimiento o relax. Estos espacios forman parte de la morfología de la ciudad, de su estructura y actúan como espacios descompresores del volumen edificado. Una dotación equilibrada de espacios de estancia contribuye al bienestar físico, emocional y de relación de los ciudadanos.

c. Calidad del aire

- Favorecer un espacio público confortable desde el punto de vista de la calidad del aire. El actual modelo de movilidad urbana basado en el vehículo privado es la principal fuente de emisión de contaminantes.
  La mejora de la calidad del aire urbano pasa por la implantación de planes de movilidad y espacio público que consigan un cambio en el reparto modal: traspaso modal del vehículo privado hacia otros modos menos contaminantes (a pie, bicicleta o transporte público).

d. Confort acústico

- Crear un espacio público confortable acústicamente donde la gran mayoría de la población esté expuesta a niveles de ruido por debajo de los niveles admisibles.
- Adoptar medidas para reducir el impacto acústico derivado de la propia actividad urbana: restringir el espacio para el vehículo de paso, reducir la velocidad en

las calles de uso prioritario peatonal, utilizar pavimentos fonoabsorbentes, entre otros.

e. Confort térmico

- Crear un espacio público confortable desde el punto de vista térmico.
- Atender las características climáticas del emplazamiento (estación más desfavorable) para crear estrategia de mejora o mitigación: espacios sombreados, elección de materiales de pavimentos y fachadas, configuración del trazado de las calles, etc.

f. Influencia mecánica del viento

- Crear un espacio público confortable desde el punto de vista de la presión que ejerce la fuerza del viento sobre las personas. Atender las características climáticas del emplazamiento (estación más desfavorable) para crear estrategias de mejora o mitigación: plantación de arbolado a modo de pantalla vegetal.

g. Accesibilidad del viario

- Reducir el número de barreras físicas que inciden en los desplazamientos de las personas con movilidad reducida o que van a pie.

h. Espacio viario destinado al peatón

- Crear recorridos peatonales seguros y sin fricciones con el tráfico de vehículos a motor.
- Favorecer un espacio público de calidad que pueda acoger múltiples usos para la convivencia y para la interacción entre las personas.

i. Proporción de la calle

- Asegurar una proporción de la calle (relación entre la altura de los edificios y la distancia entre ellos) que provea espacios con buena luminosidad natural, insolación y percepción de vista al cielo.

j. Percercepción espacial del verde urbano

- Incorporación de verde urbano en el trazado viario. La presencia de vegetación en el viario permite crear ambientes de sombra y paisajes de color y sonoros.

4.4. Ámbito 3. Movilidad y servicios

4.4.1. Funcionalidad

El modelo de movilidad[5] del Urbanismo Ecológico se apoya en los modos de transporte alternativo al vehículo privado. En una ciudad que camina hacia la sostenibilidad, el porcentaje de viajes en vehículo privado no debería superar el 10% de los viajes totales y el porcentaje de ocupación de las calles para la motorización no debería pasar del 25%, en el resto (más del 75%) quien domina el espacio es el peatón.

El modelo de movilidad del Urbanismo Ecológico garantiza la funcionalidad del sistema con un consumo de energía y unas emisiones de contaminación atmosférica y ruido mínimos, a la vez que aumenta la seguridad y reduce los accidentes de tráfico.

El Urbanismo Ecológico establece un conjunto de condicionantes (expuestos más adelante) que permiten hacer próximos los usos y las funciones, al tiempo que promueve una diversidad de personas jurídicas suficientemente amplia como para obtener valores elevados en autocontención y autosuficiencia. La proximidad, la autocontención y la autosuficiencia son las condiciones necesarias para cambiar el actual modelo de movilidad (con porcentajes de viajes en vehículo privado elevados). La disposición del conjunto de redes e infraestructuras para la accesibilidad y la movilidad proporciona la condición suficiente.

4.4.2. Organizador de las redes: la supermanzana

La movilidad en superficie se estructurará a partir de la definición de una nueva célula urbana de aproximadamente 400 m de lado, conformando así una supermanzana. El perímetro de ésta lo conforman las vías básicas por donde circulará el vehículo de paso, el transporte público y, en su caso, las bicicletas por carriles segregados. La unión de supermanzanas da lugar a una red de vías básicas que unen, en régimen de continuidad, el conjunto de tejidos urbanos, también los nuevos tejidos planificados.

Con esta medida se garantiza la funcionalidad del sistema, al tiempo que se libera entre el 60% y el 70% de las calles[6] para otros usos.

En el interior de las supermanzanas (zonas de velocidad restringida a 10 km/h) los usos se amplían al restringir la circulación del vehículo de paso. El intercambio económico, el juego, la fiesta, la estancia, etc. son posibles cuando sustituyen al derecho de paso de los vehículos. Los vehículos que circulan por el interior de las supermanzanas son los vehículos de los residentes, de distribución, de emergencia y de servicios, pero no los vehículos de paso. Estos vehículos que circulan por el interior tienen objetivos compatibles con la ampliación de usos de las supermanzanas.

El objetivo del vehículo de paso: "ir a la mayor velocidad posible de un punto a otro", es incompatible con

[5] Un modelo de movilidad viene definido por los porcentajes de viajes en cada uno de los modos de transporte.

[6] De los estudios realizados en diversas ciudades españolas, el porcentaje de suelo liberado al coche, cuando se implantan supermanzanas, es superior al 75%.

la mayoría de usos y funciones potenciales del espacio público.

Las vías básicas que conforman las supermanzanas son las vías para la circulación del transporte público de superficie y el vehículo de paso. Éstas conforman una red que irriga el conjunto de los tejidos urbanos y se conecta con el exterior y los municipios adyacentes. Del mismo modo, las redes de bicicletas y peatones serán seguras y continuas y llegarán al conjunto del tejido, conectándose con las redes de carriles bici exteriores y caminos rurales.

Un modelo de movilidad basado en supermanzanas garantiza que todos los tejidos y el conjunto de polos de movilidad: intercambiadores de transportes, áreas comerciales, equipamientos comunitarios, espacios libres, etc. sean accesibles en cualquiera de los modos de transporte.

En un modelo de movilidad basado en supermanzanas la accesibilidad para todos, también para las personas con movilidad reducida, se garantizará en el 100% del espacio público, de los servicios públicos y de la edificación.

4.4.3. Servicios e infraestructuras

El aparcamiento de coches se dispone en la periferia de las Supermanzanas y en conexión con las vías básicas. Los edificios residenciales no cuentan con aparcamiento en el subsuelo y la distancia entre la vivienda y el aparcamiento debe ser similar a la distancia entre la vivienda y la parada de transporte público. El aparcamiento en el espacio público será el mínimo y ligado a las vías básicas. En el interior de las Supermanzanas el estacionamiento será de corta duración y relacionado con actividades para encochar y desencochar o cargar y descargar.

La distribución urbana ha de organizarse, siempre que sea posible, en plataformas logísticas que vehiculan la rotura de carga y realizan la distribución de mercancías en horarios nocturnos o que no coincidan con horario extraescolar o con determinada ocupación de la calle por personas que van a pie. La distribución debe hacerse con unidades de transporte silenciosas y no contaminantes. En caso de no contar con plataforma logística, la distribución urbana se hará con los mismos criterios anteriores.

El aparcamiento de bicicletas se admite y se regula en el propio edificio y en otros equipamientos públicos, también en la calle.

Las infraestructuras de servicios -energía, telecomunicaciones y agua- se desarrollarán preferentemente en galerías de servicios.

4.4.4. Indicadores de movilidad y servicios: principales objetivos

a. Modo de desplazamiento de la población

- Reducir la dependencia del automóvil en los desplazamientos diarios de forma que se invierta el crecimiento del peso del automóvil en el reparto modal.
- Incrementar las oportunidades de los medios de transporte alternativos, es decir, del peatón, la bicicleta y el transporte colectivo en sus diversas variantes y con un nivel suficiente de ocupación, para que los ciudadanos puedan caminar, pedalear o utilizar el transporte colectivo en condiciones adecuadas de comodidad y seguridad.

b. Proximidad a redes de transporte público alternativo al vehículo privado

- Incrementar el número de viajes cotidianos realizados en medios de transporte alternativos al automóvil privado.
- Garantizar el acceso a pie o en vehículos de dos ruedas a la red de transporte público de la ciudad (paradas de autobús urbano y/o de metro o tranvía), especialmente en áreas habitadas y puntos de generación y atracción de viajes. El acceso a redes de movilidad pública se configura clave en la promoción de una movilidad racional, sostenible y democrática. Favorecer el uso de la bicicleta como vehículo de desplazamiento urbano mediante el diseño y construcción de una red que sea accesible en tiempo y distancia y segregada del resto de modos de transporte de superficie.

c. Espacio viario de acceso restringido al vehículo de paso

- Concebir el espacio público como eje vertebrador de la ciudad, liberándolo de su función imperante al servicio del coche, para convertirlo en espacio de convivencia, de ocio, de ejercicio, de intercambio y de otros múltiples usos.

d. Aparcamiento de bicicletas

- Reservar espacio en la propia edificación para el aparcamiento de bicicletas (fuera de la vía pública).
- Garantizar un número de plazas mínimas, según normativa, en función de las actividades y usos del suelo.

e. Aparcamiento del vehículo privado fuera de calzada

- Reservar espacio en edificios técnicos y de aparcamientos (vinculados a las vías básicas) para plazas de aparcamiento de vehículos en función de las actividades y usos del suelo del área de estudio. El aparcamiento se entiende como un servicio urbano al servicio del barrio/área de actuación y no como un servicio adscrito a la propia vivienda. La dotación del número de plazas viene definida por las normas urbanísticas del propio municipio.

f. Cobertura de la demanda de aparcamiento del vehículo

- Garantizar un número mínimo de plazas de aparcamiento para el vehículo privado, fuera de la calzada, para dar cobertura a la demanda de plazas para no residentes del área de estudio.

g. Reserva de espacio para la distribución de mercancías

- Garantizar una reserva de espacio para las operaciones de carga y descarga en centros de distribución urbana fuera del viario (plataformas logísticas) con el objeto de liberar espacio público y reducir las fricciones con el flujo vehicular. El dimensionado del centro de distribución de mercancías puede variar en función del número y tipo de actividades.

h. Reserva de espacio para galerías de servicios urbanos

- Ordenar las redes de servicios urbanos mediante galerías técnicas de servicios y redes troncales de distribución. Incorporar las galerías de servicios en los planes de infraestructuras de ordenación urbana.
  Optimizar las reservas de espacio en el subsuelo como contenedor de infraestructuras urbanas. Las galerías de servicios suponen una racionalización del uso del subsuelo, permiten un mayor control de sus infraestructuras y evitan, en buena medida, interferencias entre servicios de diferentes compañías.

4.5. Ámbito 4. Complejidad Urbana

4.5.1. Información organizada

El Urbanismo Ecológico considera la complejidad urbana, es decir, el grado de organización urbana de un territorio, una de las claves para mejorar la eficiencia de los sistemas urbanos. La otra, es la disminución del consumo de recursos asociado a este incremento de las redes organizativas.

El aumento de la información organizada en un sistema urbano implica la presencia de diferentes portadores de información (actividades, asociaciones, instituciones) que establezcan relaciones múltiples y variadas entre ellos. En los sistemas urbanos esta cualidad se traduce en contacto e intercambio, al igual que sucede en los sistemas naturales.

Tanto en los sistemas naturales como en los urbanos el aumento de la complejidad supone un incremento de la organización contribuyendo a la estabilidad y continuidad del propio sistema. Una sociedad avanzada que alcance un elevado grado de organización favorece el desarrollo de una estrategia competitiva basada en la información y el conocimiento orientada a disminuir la presión sobre los recursos materiales. Un ejemplo de este tipo de estrategia son las llamadas actividades @, densas en conocimiento.

El Urbanismo Ecológico busca estas condiciones a partir de la configuración de espacios con un cierto grado de compacidad, centralidad y accesibilidad. Estas condiciones son a menudo el resultado de un proceso evolutivo de maduración urbana aunque se pueden acelerar a través de la planificación estratégica como es el caso de las áreas de nueva centralidad.

Una estructura densa y heterogénea de portadores de información mitiga también la necesidad de movilidad intraurbana creando patrones de proximidad entre vivienda-trabajo, vivienda-ocio o vivienda-servicios.

4.5.2. Mezcla de usos y funciones urbanas

En los nuevos procesos urbanísticos se propicia la diversidad urbana a partir de la integración de usos y funciones en las diferentes escalas de intervención. Un porcentaje no inferior al 20% de la edificabilidad se destina a usos diferentes a la vivienda. La variedad de usos garantiza un desarrollo equilibrado de la estructura social y la satisfacción parcial de la demanda local de trabajo.

El reparto de la superficie de techo no residencial se distribuye de forma homogénea y se restringe la creación de grandes superficies comerciales. En los principales recorridos e itinerarios peatonales se potencia la implantación de actividades diversas (oficinas, pequeños talleres, etc.) mediante volumetrías específicas flexibles.

Se aprueba la mezcla tipológica de la vivienda con otros espacios para posibilitar la disposición de manzanas o parcelas de uso polifuncional que permitan la integración de determinados equipamientos con el uso residencial.

4.5.3. Ciudad del conocimiento

El Urbanismo Ecológico apuesta por un modelo de ciudad compleja que cuente con actividades densas en conocimiento (actividades @) por la alta capacidad de organizar y gestionar la información.

Una fracción de la edificabilidad no residencial se destina a actividades o equipamientos @ para potenciar la investigación, la innovación y la creatividad. Esta dotación es variable en función de las potencialidades del objeto de estudio y de la presencia de polos de atracción próximos.

4.5.4. Actividades de proximidad

En los nuevos procesos urbanísticos también se reservan espacios para la disposición de recursos y servicios de proximidad de uso cotidiano: actividades ligadas a la alimentación, prensa o productos farmacéuticos. Esta reserva equivale aproximadamente a un ratio de 3,5 actividades de proximidad por cada 1.000 residentes o un 5% del aprovechamiento lucrativo no residencial.

4.5.5. Indicadores de complejidad urbana: principales objetivos

a. Diversidad urbana

- Aumentar la información organizada de la ciudad. Incrementar las probabilidades de contacto, regulación, intercambio y comunicación entre los diferentes agentes del sistema urbano: portadores de información.
- Potenciar una estrategia urbana basada en el conocimiento y la información y no en el consumo masivo de recursos.

b. Equilibrio entre actividad y residencia

- Conseguir una ciudad compleja, no especializada, en la que se mezclen las diferentes funciones y usos urbanos compatibles.
- Generar patrones de proximidad trabajo-residencia para mejorar la autocontención de la movilidad y la satisfacción de las necesidades cotidianas por parte de la población residente.

c. Proximidad a actividades comerciales de uso cotidiano

- Crear espacios residenciales con los servicios de proximidad necesarios para satisfacer las compras cotidianas: compra de pan, productos farmacéuticos, etc. Se valora positivamente la presencia de actividades especializadas y no tanto la presencia de una única actividad con variedad de productos.

d. Actividades densas en conocimiento: actividades @

- Crear espacios urbanos con equipamientos o actividades densas en conocimiento.
- Fomentar la producción, intercambio, comercialización y difusión de conocimiento como elementos claves del crecimiento y la competitividad a partir de la innovación, la investigación y la creatividad.

e. Continuidad espacial y funcional de la calle

- Crear espacios urbanos con ejes interactivos que garanticen la continuidad de la intensidad de información y la continuidad con la estructura urbana existente.
- Conformar trayectorias que sean atractivas para los peatones, mediante la disposición de locales comerciales en planta baja, y seguras, mediante un reparto del viario adecuado. Estos ejes permiten crear lazos con los tejidos consolidados para el mantenimiento de los vínculos sociales y comerciales.

4.6. Ámbito 5. Espacios verdes y biodiversidad

El aumento de la biodiversidad en un contexto urbano se orienta hacia una ordenación del verde urbano que propicie la atracción de avifauna, que haga la traza urbana más permeable a los elementos naturales y que ofrezca espacios verdes de relación y de recreo a la población residente.

4.6.1. Red verde

Conformará un mosaico verde de interconexión entre parques, jardines, espacios intersticiales, interiores de manzana y calles interiores de supermanzana. Creará una red verde entre las diferentes matrices de la ciudad con un entramado de itinerarios peatonales de enlace.

La integración y ordenación de la matriz verde y rural mejorará la calidad y funcionalidad de ésta en los procesos urbanísticos. Asimismo, preservará las unidades naturales para evitar procesos de fragmentación.

4.6.2. Estructura

Se establece una dotación mínima de espacio verde por habitante (10 m²/habitante) y se articula a través de la red de espacios verdes accesibles de forma cotidiana. El acercamiento de los ciudadanos a una red interconectada de espacios verdes de proximidad supone que se da cobertura a las necesidades de recreo y que garantiza la accesibilidad para aquellos ciudadanos con movilidad reducida. La reserva de espacios responde a una lógica escalar que varía en función de la superficie de masa verde y del tiempo de acceso. Así, por ejemplo, se contemplará que la totalidad de los residentes tengan acceso a menos de 200 metros a un espacio verde mayor de 1.000 m²; o tengan acceso a menos de 750 metros a un espacio verde mayor de 5.000 m².

Se compensa el sellado y la impermeabilización del suelo, derivado del proceso de urbanización, mediante la reserva de suelo permeable. Así se promueven patrones urbanísticos de bajo impacto con la disposición de suelos que potencien la vida vegetada, regulen el ciclo hidrológico y mejoren las condiciones de confort ambiental.

El verde se proyectará no sólo en superficie sino también en altura, teniendo en consideración la reserva de espacios para cubiertas verdes y para paredes vegetadas. Los beneficios se traducirán en un mejor aislamiento térmico y acústico de las edificaciones, en la mitigación de calor producido por la actividad humana (isla de calor), en la mitigación del cambio climático por su capacidad de retención de CO_2 o en un incremento de la fauna vinculada a la vegetación.

4.6.3. Conectividad del verde urbano

El arbolado viario es uno de los principales elementos vegetales de las ciudades actuando como elemento estructural de la biodiversidad en el ecosistema urbano. Es por ello que se determinará la densidad y diversidad de las unidades arbóreas en las trazas viarias para potenciar la heterogeneidad estructural del verde y garantizar la conectividad de los espacios verdes. Se identificarán los corredores verdes urbanos según criterios de permeabilidad del suelo, de confort acústico y de diversidad del arbolado.

Desde el punto de vista estético, las intervenciones urbanísticas deben generar un paisaje natural que cumpla con las características de compatibilidad con el medio y que refuerce la atracción y los referentes visuales.

Teniendo en consideración los condicionantes tanto ambientales (el agua, la temperatura, la luz) como atractivos, funcionales y estéticos, se proponen los siguientes criterios para la elección de las especies vegetales: la plantación de especies originarias de la zona o de gran adaptabilidad a las condiciones climáticas y

edafológicas, la introducción de especies resistentes al ataque de plagas y que no sean invasoras, y la selección de especies variadas para crear diversidad cromática en las calles a lo largo de las cuatro estaciones del año.

4.6.4. Indicadores de espacios verdes y biodiversidad: principales objetivos

a. Permeabilidad del suelo

- Compensar el sellado y la impermeabilización del suelo derivada del proceso urbanizador y constructivo mediante la reserva de suelo permeable: espacios verdes y teselas de suelo estructural a nivel de superficie y espacios verdes en las cubiertas de los edificios públicos.

b. Espacio verde por habitante

- Reservar una dotación mínima de espacio verde por habitante por los beneficios que reporta en el bienestar físico y emocional de las personas y por su papel fundamental en el medio ambiente y la biodiversidad urbana.
- Planificar una red verde estructurada reservando espacios verdes (sistema de verde local), espacios en los interiores de manzana, de carácter público y preferentemente poco pavimentados y permeables, e incorporando verde en el espacio construido (cubiertas vegetales de tipo extensivo).

c. Proximidad simultánea a espacios verdes

- Acercar a los ciudadanos a una red interconectada de espacios verdes de proximidad para dar cobertura a las necesidades de recreo. La dotación de espacio verde se articula a través de una red de espacios verdes de dimensiones y funcionalidades diversas accesibles de forma cotidiana: desde espacios verdes de 500 m² hasta espacios mayores de 10 ha, a una distancia que se pueda recorrer a pie o bien mediante un corto desplazamiento en transporte público (4 km).

d. Densidad de árboles por tramo de calle

- Evaluar la densidad de árboles presentes en el tejido urbano. Las calles arboladas de una ciudad pueden considerarse como corredores potenciales ya que mejoran la conectividad del ecosistema urbano, permitiendo que ciertas especies sobrevivan y/o se reproduzcan. Tener una adecuada densidad de arbolado en las calles puede propiciar una mejora local de los corredores verdes urbanos.

e. Cubiertas verdes

- Desarrollar una segunda superficie de verde en altura, combinada con la superficie verde a cota cero y conectada con el arbolado de gran porte, enredaderas, etc., para potenciar la biodiversidad urbana y la conexión del verde urbano con el verde periurbano. Las cubiertas verdes reportan una mejora del aislamiento térmico y acústico de la edificación, reducen el calor producido por la actividad humana (isla de calor), mitigan, en parte, el cambio climático por su capacidad de retención de CO_2, y se incrementa la fauna vinculada a la vegetación.

4.7. Ámbito 6. Metabolismo urbano

El Urbanismo Ecológico busca la máxima autosuficiencia funcional y metabólica de los ecosistemas urbanos.

La autonomía de los flujos metabólicos para un área determinada implica una disminución de la entropía proyectada en el sistema-entorno derivada del consumo masivo de materiales, energía, agua y alimentos.

La planificación urbanística reservará espacios en los tres niveles de ordenación (subsuelo, superficie y altura) para aprovechar al máximo los recursos metabólicos locales.

4.7.1. Gestión de la energía

La eficiencia energética busca la aproximación a la autosuficiencia a partir de la generación de energías renovables y la adopción de medidas de ahorro y eficiencia para los principales sectores consumidores: doméstico, servicios y equipamientos, movilidad, sector primario y los relacionados con los flujos másicos (gestión del agua y los residuos).

Los proyectos de ordenación incorporarán todos aquellos sistemas pasivos y activos que acerquen el nuevo urbanismo a la autosuficiencia energética.

Para la reducción de la energía de uso en la edificación se tendrá en cuenta los sistemas pasivos incorporados en la misma construcción aplicando principios bioclimáticos: orientación, el propio diseño del edificio, el aislamiento de ventanas y muros, la protección solar en cubiertas y fachadas, el control de la ventilación e infiltraciones, entre otros.

En cuanto a la generación de energías renovables, se analizará la viabilidad de aprovechamiento de las fuentes renovables locales según las condiciones físicas y climáticas del ámbito de actuación: solar térmica, fotovoltaica, biomasa residual, geotermia, eólica, etc.

En los nuevos desarrollos urbanos y en las áreas en rehabilitación, como mínimo el 35% del total de la energía de una vivienda se deberá proporcionar mediante tecnologías de captación solar. La cuota de autoproducción mínima para la demanda térmica (calefacción y refrigeración) será del 50% y del 70%, para ACS. También se incorporarán paneles fotovoltaicos para cubrir el 100% de la energía eléctrica de los elementos comunes del edificio (ascensor, luz escalera, etc.).

Por lo tanto, el proyecto de ordenación reservará espacios en las cubiertas para la instalación de captadores de energía térmicos y fotovoltaicos. En el subsuelo, se valorará la instalación de acumuladores para grandes volúmenes de agua caliente. Estos depósitos aportan la energía base para calentar o enfriar grandes volúmenes de agua a partir de energía solar. El diferencial hasta la temperatura idónea es aportado por bombas de calor o por la central energética del distrito a través de redes de agua caliente y fría.

4.7.2. Gestión del agua

La eficiencia en el ciclo del agua está sujeta básicamente a dos grandes aspectos: el primero, la optimización de la demanda de agua doméstica, comercial y pública y el segundo, a la sustitución de parte de la demanda por agua no potable procedente del ámbito urbano, mediante el aprovechamiento de aguas pluviales, grises, subterráneas y otras posibles fuentes vinculadas al entorno urbano.

Las ciudades no sólo representan una parte importante de la demanda de agua para fines sociales y económicos, sino que constituyen una de las interfases más contaminantes en los usos del agua. La autosuficiencia de suministro urbano constituye un objetivo de alta prioridad en la gestión del ciclo hidrológico, tanto por la significación en el balance general del agua como por la aportación a la reducción de la contaminación ambiental.

El nuevo Urbanismo Ecológico busca la optimización de los consumos de agua sobre la base de una nueva cultura del agua, que haga posible, además, mediante criterios adecuados de gestión y aplicación de tecnología punta, la regeneración y reciclaje de las aguas marginales urbanas, de tal manera que se disminuya la presión sobre las fuentes naturales en el mayor grado posible, con demandas energéticas mínimas y contaminación cero de los cuerpos receptores de las aguas depuradas.

En los nuevos desarrollos, el consumo de agua potable por habitante y día debería ser inferior a 70 litros, 65 de los cuales, derivados del consumo doméstico.

Para la optimización de las aguas marginales se contempla la creación de sistemas separativos de evacuación, captación de aguas pluviales y tratamiento in situ y/o centralizado de bajo consumo energético. La regeneración de aguas marginales representa la proporción de la demanda urbana que sustituye el suministro urbano de agua no potable. Las aguas regeneradas pueden ser utilizadas en el ámbito doméstico, público, comercial o extraurbano (WC, limpieza, riego de parques y jardines).

Los nuevos proyectos urbanísticos incorporarán las infraestructuras necesarias para la gestión de las aguas marginales urbanas sujetas de regeneración: aguas grises domésticas, aguas pluviales colectadas en las cubiertas de los edificios y aguas pluviales procedentes del espacio público de aquellas calles interiores de supermanzana (calles de uso restringido al vehículo de paso). El nivel de suficiencia mínimo considerado de las aguas no potables es del 40%.

Se excluyen del proceso de regeneración y reciclaje las aguas negras domésticas, el pluvial colectado en calles no interiores de supermanzana y las aguas procedentes de la limpieza viaria por su toxicidad y elevado coste energético asociado a su tratamiento.

Para la optimización de las aguas no potables y la obtención de un alto grado de autosuficiencia se requiere la recuperación y el aprovechamiento sostenible de los recursos subterráneos para el abastecimiento y recargando a partir del reciclaje de las aguas marginales (pluviales y grises).

Regulación de las escorrentías y protección de los sectores ante riesgo de inundación. Según el artículo 11 del Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, el planeamiento y ejecución de los sectores urbanizables debe permitir alcanzar unos niveles adecuados de protección frente al riesgo de inundación. Se diferenciará la zona fluvial (la parte de la zona inundable que incluye el cauce del río y sus riberas), delimitada de acuerdo con la avenida para el periodo de retorno de 10 años, la zona de sistema hídrico, es decir, la parte de la zona inundable que el instrumento de planificación hidrológica correspondiente delimita de acuerdo con la avenida para el periodo de retorno de 100 años y la zona inundable por períodos extraordinarios, a partir de la avenida de periodo de retorno de 500 años.

Siempre que las condiciones físicas del entorno lo permitan, se considerará la posibilidad de crear un sistema de lagunas artificiales para su función reguladora de escorrentías y aguas regeneradas, suministro de agua para el regadío y hábitat ecológico de gran valor.

4.7.3. Gestión de residuos

La eficiencia en la gestión de los residuos se fundamenta en una reducción del consumo de recursos y en el cierre (máximo posible) del ciclo de los materiales. Estos propósitos se traducen en una desmaterialización de los bienes de consumo. La prevención, la eficiencia en la producción y el consumo, el ahorro de materias primas, la recogida selectiva y mejor valorización de los recursos contenidos en los residuos, etc., son claves para la consecución de este objetivo.

Los procesos de urbanización, nuevos o renovaciones, deberán incorporar los mecanismos y las infraestructuras necesarias para una gestión eficiente de los residuos en la edificación y en la vivienda, en el subsuelo y en el espacio público. Se utilizarán preferentemente materiales reciclados o renovables y de origen local.

El planeamiento considerará el sistema de recogida puerta a puerta como sistema preferente. Se reservarán espacios en los interiores de las viviendas para el depositado de los residuos segregados en origen para 5 fracciones (papel, vidrio, envases, orgánica y rechazo) hasta el día de recogida. Para otros usos no residenciales, se dispondrá de espacios individuales o comunitarios para el almacenamiento fraccionado de los residuos generados.

También se reservará una superficie ligada a equipamientos técnicos u otros equipamientos públicos para la localización de un centro de recogida. El dimensionado estará ligado a la masa crítica de usuarios potenciales y la localización espacial estará cercana a la población (acceso a pie).

Para el cierre del ciclo de la materia orgánica se reservarán espacios libres públicos y privados (espacios interiores de manzana, espacios verdes) destinados al compostaje. El compost generado se destinará a unidades de huertos urbanos y/o abonado de parques y jardines locales.

En actuaciones con un fuerte componente agrícola y ganadero se planteará la posibilidad de tratar la recogida selectiva de materia orgánica proveniente del ámbito doméstico y otros grandes generadores, en una planta agrícola de compostaje o de metanización común.

Se utilizarán preferentemente materiales renovables, reciclados y reciclables de origen local en los procesos constructivos.

4.7.4. Calidad del aire y cambio climático

El ruido y los contaminantes atmosféricos constituyen un riesgo de primer orden para la calidad ambiental y la salud pública de las personas. Los modelos de movilidad apoyados en el vehículo privado han erigido al tráfico rodado como la principal fuente de emisión de contaminantes. En los medios urbanos, destacan por una mayor concentración, los contaminantes nitrogenados (NOx) y de material particulado (PM10). La mejora de la calidad del aire pasa por un cambio de los modos de desplazamiento de la población hacia modos de transporte alternativo y menos contaminante que el vehículo privado. El modelo de movilidad sostenible del Urbanismo Ecológico revierte hacia escenarios más saludables.

Los nuevos proyectos urbanísticos deben incorporar actuaciones estratégicas para la reducción de las emisiones de gases precursores del efecto invernadero (GEI), con el fin de mitigar los efectos del cambio climático.

Los nuevos procesos urbanísticos deberán permitir la reducción de la emisividad de gases de efecto invernadero derivados de la obtención y mantenimiento de la habitabilidad urbana. Se considerarán, por un lado, las emisiones generadas en la fabricación de los materiales con los que se construirán los edificios y, por otra, se procurará una cobertura de las necesidades energéticas con un mayor porcentaje de energía renovable.

Las tipologías consideradas por el planeamiento deberán poder construirse con unas emisiones inferiores a 300 kg de CO_2 por metro cuadrado en la fabricación de los materiales que las constituyen.

Por otra parte, el Urbanismo Ecológico incorpora medidas que ayudan a reducir las inundaciones, los períodos de sequía extrema y las olas de calor, es decir, medidas para adaptarse al cambio climático.

4.7.5. Indicadores de Metabolismo Urbano: Principales Objetivos

a. Demanda energética en el sector residencial

- Reducir la dependencia energética del espacio construido residencial mediante el fomento del ahorro y la eficiencia energética; el ahorro implica renunciar a la utilización de recursos energéticos que no sean estrictamente necesarios para cubrir unas determinadas funciones básicas y adquirir unos niveles estándares de confort. La eficiencia, implica maximizar la prestación de un servicio (calefacción, refrigeración, iluminación, etc.) con el mínimo consumo posible.

b. Demanda energética en los servicios y equipamientos

- Reducir la dependencia energética del espacio construido de los servicios y equipamientos mediante el fomento del ahorro y la eficiencia energética.

c. Demanda energética en el espacio público

- Reducir la dependencia energética en el espacio público mediante el fomento del ahorro y la eficiencia energética: conseguir la máxima eficiencia energética de las instalaciones de luminarias y elementos auxiliares.

d. Producción local de energías renovables

- Conseguir la máxima producción local de energías renovables.

e. Consumo energético

- Reducir el consumo energético (combustibles fósiles y electricidad) para incrementar el ahorro económico y reducir así las emisiones de CO_2 derivadas.

f. Emisiones de CO_2

- Reducir las emisiones de gases precursores del efecto invernadero (GEI) con el fin de mitigar los efectos del cambio climático.

g. Autosuficiencia energética a partir de energías renovables

- Conseguir la máxima autosuficiencia energética a partir de una reducción del consumo energético al mínimo indispensable y, al mismo tiempo, cubrir esta demanda energética mediante la producción de energías renovables.
- Avanzar hacia un escenario neutro en carbono.
- Conseguir un mayor grado de independencia energética y un descenso de la vulnerabilidad de los sistemas a

partir de la captación de energías renovables a escala local.

h. Demanda hídrica (por calidades y total)

- Incrementar la eficiencia en el consumo de los recursos hídricos y mejorar su calidad. La eficiencia está sujeta básicamente a dos grandes aspectos: el primero, a la optimización de la demanda de agua de los usos urbanos a partir de la aplicación de medidas de ahorro y, el segundo, a la sustitución de parte de la demanda total por agua no potable procedente del ámbito urbano: aprovechamiento de las aguas pluviales, grises y subterráneas.

i. Suficiencia hídrica

- Lograr el mayor grado posible de autosuficiencia en el suministro de agua urbana mediante la minimización de la demanda hídrica al mínimo indispensable para satisfacer las necesidades básicas, el reciclaje de las aguas servidas y el aprovechamiento de las fuentes urbanas no convencionales.

j. Recogida selectiva neta

- Reducir la generación de residuos urbanos y recoger, de forma segregada, los residuos urbanos para posibilitar así su reciclaje y la fabricación de nuevos productos y evitar que se destinen a vertederos o incineradoras. Esto significa un ahorro energético y de materiales en comparación con los requerimientos que tendría la fabricación de productos partiendo de las materias primas originarias.

k. Proximidad a puntos de recogida de residuos

- Conseguir la máxima captación selectiva de residuos.
- Acercar los puntos de recogida de residuos a los ciudadanos para incrementar las aportaciones de la recogida selectiva.

l. Proximidad a un punto limpio

- Fomentar y facilitar la recogida selectiva de aquellas fracciones que no disponen de contenedores específicos y potenciar la recogida de los residuos especiales y de materiales como muebles, ropa, pinturas, fluorescentes, etc., susceptibles de ser reciclados y/o reutilizados o que por su peligrosidad deben ser tratados.

h. Cierre del ciclo de la materia orgánica

- Acercarse al cierre del ciclo de la materia orgánica generada dentro de la misma zona donde se produce.
- Favorecer la aplicación de los procesos de compostaje in situ con una participación generalizada de la población.
- Reservar espacios para aplicar el compost generado y así asegurar el cierre del ciclo.

i. Producción local de alimentos básicos

- Favorecer sistemas de producción sostenibles de alimentos básicos a escala local y patrones de consumo más eficientes y saludables.
- Reservar espacios en los espacios libres, en interiores de manzana para la creación de huertos urbanos y en las cubiertas de los edificios para mesas de cultivo.

4.8. Ámbito 7. Cohesión social

4.8.1. Mezcla de población

La cohesión social en el contexto urbano hace referencia al grado de convivencia existente entre grupos de personas con culturas, edades, rentas y profesiones diferentes. El incremento de la cohesión social está íntimamente relacionado con los conceptos de diversidad y mixticidad de actividades que proporciona el modelo de ciudad compacta y compleja. La proximidad o compacidad favorece el contacto entre los grupos de personas, y la mixticidad o complejidad favorece la presencia de grupos diversos.

El análisis de diversas realidades urbanas pone de manifiesto que la segregación social difusa en determinados lugares de la ciudad, viene a menudo de la mano de la separación de usos y funciones propias de la dispersión urbana. La separación de grupos por razones de renta, edad, cultura u otros, genera desconocimiento mutuo, lo que propicia sentimientos de inseguridad y marginación basados en el temor al otro.

La sostenibilidad debe ser universal: las actuaciones deben planificarse de tal manera que las estrategias de sostenibilidad puedan ser adoptadas por todos los ciudadanos, independientemente de su condición social.

4.8.2. La vivienda

Toda acción sobre el parque inmobiliario de una ciudad, ya sea de transformación, sustitución o rehabilitación tiene incidencia sobre la estructura social. Las actuaciones sobre la vivienda son claves para evitar la exclusión social, precisamente porque la vivienda es el primer factor de segregación urbana, ya que sobre el mismo se aplican directamente filtros para renta en función de su precio. Un parque amplio y estable de vivienda protegida es una de las mejores medidas para garantizar el acceso a la vivienda.

Para incentivar el principio de diversidad en la composición social de los residentes, es importante que en nuevos procesos urbanísticos se adecúen los programas habitacionales a las características sociales de la población destinataria y a la tipología existente en los tejidos adyacentes.

Entre el 30% y el 50% de la edificabilidad urbanística residencial se destinará a vivienda protegida en las diferentes modalidades previstas en la legislación sectorial.

La vivienda protegida estará localizada en emplazamientos con buena accesibilidad a los equipamientos, zonas verdes y redes de transporte público. Un reparto homogéneo fomenta las relaciones de vecindad entre grupos diversos. La mezcla de viviendas según régimen de tenencia (propiedad o alquiler), titularidad (libre o protegida) o medidas se repartirá de forma que haya una distribución espacial lo más igualitaria posible: en un conjunto de manzanas, en una misma manzana o en una misma parcela.

4.8.3. Equipamientos públicos

Se proyectará una dotación óptima de equipamientos públicos con un dimensionado que garantice criterios de diversidad y distribución equilibrada. La cuantificación según uso responderá a las necesidades de la demanda generada por los nuevos residentes y por el déficit resultante en los sectores ya consolidados. En todo caso, se matizará en función de dos criterios: el tipo de tejido urbano y la caracterización demográfica.

Creación de una red de equipamientos públicos de proximidad como condición básica para garantizar criterios de accesibilidad y, por tanto, de mejora de la habitabilidad urbana. Las reservas de equipamiento público se repartirán de tal forma que el usuario acceda a pie, con radios que oscilen entre los 300 y los 600 metros dependiendo del tipo de equipamiento.

Se entiende por equipamiento básico o de proximidad aquel que cubre las necesidades más cotidianas de la población, y que constituye el primer nivel de prestación de servicios, con un ámbito de influencia que se limita al barrio en el que se emplazan. Los equipamientos considerados son: culturales (centros cívicos asociativos, bibliotecas de barrio, centros culturales), deportivos (pistas polideportivas al aire libre, pequeños complejos deportivos, polideportivos, campos deportivos extensivos), educativos (escuelas infantiles, centros de educación primaria, centros de educación secundaria, centros de bachillerato/FP superior, centros de formación de adultos, especializados y ocupacionales), sanitarios (centros de salud y urgencias) y asistenciales (centros de servicios sociales, centros de día, residencias de ancianos).

4.8.4. Indicadores de cohesión social: principales objetivos

a. Envejecimiento de la población

- Buscar el equilibrio de la población de diferentes edades en un mismo barrio o área de estudio en relación al conjunto de una ciudad.
- Aumentar la cohesión de los grupos de edades diversas a partir del contacto en un mismo espacio físico, sin segregación espacial por razones de edad.

b. Población de nacionalidad extranjera

- Buscar el equilibrio de la población de diferentes procedencias en un mismo barrio o área de estudio.
- Aumentar la cohesión de los grupos de procedencias diversas a partir del contacto en un mismo espacio físico, sin segregación espacial.

c. Titulados superiores

- Buscar el equilibrio de la población de diferentes rentas.
- Aumentar la cohesión de grupos de rentas diversas a partir del contacto en un mismo espacio físico, sin segregación espacial.

d. Dotación de vivienda protegida

- Conseguir que la composición del parque de viviendas no excluya a ningún ciudadano por razones de renta, al tiempo que se mezclan en un espacio determinado (manzana) los diferentes regímenes de protección oficial y tipologías de viviendas (libre, protegida) para mitigar la segregación social dentro del ámbito de actuación y de la ciudad.

e. Dotación de equipamientos básicos

- Conseguir que toda la población, independientemente de sus características sociodemográficas, tenga a su disposición una dotación óptima de equipamientos básicos o de proximidad de titularidad pública: educativos, culturales, sanitarios, deportivos y bienestar social. Estos equipamientos cubren las necesidades más cotidianas de la población y constituyen el primer nivel de prestación de servicios, con un ámbito de influencia que se limita al barrio o el distrito donde se emplazan.

f. Proximidad simultánea a equipamientos básicos

- Conseguir que la población disponga, a 5 ó 10 minutos a pie (según el equipamiento), del mayor número de equipamientos básicos diferentes. De esta manera, podrá cubrir a pie las diferentes necesidades culturales, educativas, sanitarias, etc. sin recurrir a otros medios de transporte. Una vez la población del ámbito está dotada de una cantidad suficiente de suelo de equipamientos como para satisfacer las necesidades básicas de todos los grupos sociales, es necesario distribuirlos de forma adecuada.

4.9. Ámbito 8. Habitabilidad en la vivienda y el edificio

La habitabilidad en la vivienda y el edificio se orienta hacia una concepción del espacio flexible, polifuncional, sostenible y adaptable en el tiempo: se trata de potenciar el valor de uso de las viviendas en función de las necesidades cambiantes de la sociedad y de mantener el valor de uso de la vivienda durante el mayor tiempo posible. También es

prioritario considerar la habitabilidad en la vivienda dentro de un conjunto mas amplio -el espacio urbano de cara a conseguir una ciudad socialmente cohesionada y concebida con criterios de sostenibilidad.

4.9.1. La Habitabilidad en la vivienda

El planeamiento ha de integrar el criterio de perfectibilidad en tanto que puede condicionar la vida efectiva de las viviendas. Se trata de interiorizar el hecho de que una vivienda tarda un cierto tiempo en ser acomodada y optimizada por sus ocupantes para evitar el despilfarro del gasto publico y/o privado en aquello que es susceptible de ser modificado o sustituido. Pretender ahorrar en los aspectos que el tiempo no puede modificar -como la superficie insuficiente o el modelo de agrupación inadecuado - y, en cambio, derrochar recursos en aquellos que durante la vida de la vivienda se pueden ir mejorando, es un deficiente planteamiento económico.

Adopción de criterios de sostenibilidad y ahorro energético en relación a las tipologías edificatorias. El principal criterio de sostenibilidad y de ahorro energético debe partir del mismo concepto arquitectónico del conjunto y de las viviendas, principalmente de su relación con el exterior y de la consideración del control climático a partir de medios naturales (sistemas pasivos de captación solar; protección solar y su adecuación a las estaciones climáticas; la agresión exterior y los espacios intermedios, la ventilación cruzada natural, etc.).

Respecto a las tipologías, es conocido que las viviendas pasantes, con dos fachadas contrapuestas, son las que mejor responden a los requerimientos climáticos y por lo tanto, al ahorro energético. La ventilación transversal de la vivienda, disponiendo de dos fachadas con diferente grado de iluminación, temperatura o vistas, aporta una complejidad ambiental en el espacio y enriquece la forma de vivir la vivienda. Con las viviendas pasantes, casi generalizadas fuera de nuestro país, se establece un diálogo deseable con el entorno urbano porque permiten que los usuarios puedan disfrutar desde su vivienda de diferentes grados de urbanidad y privacidad.

Se contempla la creación de espacios intermedios con el exterior, es decir, de espacios situados fuera de la envolvente térmica de la superficie habitable que ofrecen una respuesta versátil y eficaz ante las condiciones climáticas y acústicas exteriores, y que representan una mejora de las posibilidades de ahorro energético de la vivienda en las diferentes estaciones y orientaciones. Las normas urbanísticas no considerarán superficies computables las de aquellos espacios no calefactados en el perímetro de la vivienda y con una superficie agregada no superior al 20% de la superficie total.

Todas las viviendas deberán ser practicables: la capacidad de ser habitables para personas con movilidad reducida no sólo es una cuestión de dignidad social sino una garantía de calidad dimensional de la vivienda.

El Urbanismo Ecológico apuesta por la flexibilidad y la adaptabilidad de la vivienda: desjerarquización de la vivienda. La introducción de una prestación de mayor capacidad de adaptabilidad en la concepción de la vivienda conlleva la revisión de algunos criterios constructivos, tipológicos o normativos. Se han propuesto varios mecanismos: desde las teorías que distinguen los componentes estructurales de carácter básico y fijos, otros incorporables y modificables según el deseo de los usuarios, la reducción de los cierres fijos y la incorporación de elementos móviles, o la posibilidad de incorporar otros espacios de la vivienda de uso indefinido.

A pesar de las facilidades que ofrecen las nuevas técnicas de construcción, en la práctica no resulta tan fácil la modificación instantánea o eventual de la distribución de la vivienda. Más eficacia ofrece la línea que fundamenta la flexibilidad de la vivienda en la compartimentación ambigua que admite la polivalencia de usos sin la necesidad de transformaciones posteriores. Este enfoque pone en crisis la tradicional jerarquización espacial de las viviendas que adjetiva y prefija el uso de las habitaciones: dormitorios de los padres, de dos camas, individuales, etc., para abrir un horizonte en el que las habitaciones sean de una superficie similar y puedan ocuparse según las necesidades cambiantes de los miembros del hogar.

La revisión del concepto tradicional de las estancias de la vivienda debe dar respuesta a los requerimientos cambiantes entre la relación colectiva e individual dentro del hogar. Las normas urbanísticas favorecerán los programas de vivienda con indiferenciación funcional de sus piezas. Esta revisión debe centrarse en:

- El papel de la cocina y su articulación con la sala de estar/comedor.
- El papel de la cocina como lugar de relación y tareas compartidas. Pérdida del papel representativo del comedor.
- Desjerarquización del papel de los dormitorios.
- Dormitorios concebidos como estancias con capacidad de facilitar actividades que superen estrictamente la del reposo, para recoger las individuales o los subgrupos del hogar al margen del núcleo familiar (estudiar, trabajo en casa, leer, escuchar música, jugar, utilizar el ordenador, relacionarse, etc.).

Dar respuesta a la necesidad de autonomía y de privacidad de los integrantes del hogar, el trabajo en casa -laboral o de aprendizaje- la utilización personal de los medios informáticos, la situación de las familias inmigrantes y la compatibilidad con situaciones de reagrupamiento familiar, etc.

Una vivienda digna es aquella que garantiza las condiciones de seguridad, estabilidad, diseño y salubridad necesarias, y que a la vez permite un adecuado desarrollo de la persona en todas sus facetas y actividades. El diseño de una vivienda va mas allá de conseguir el máximo valor de uso, ya que se trata de proyectar un espacio para las personas y, como tal, debe ser dotado de valores añadidos que hagan referencia a su calidad espacial, a su complejidad o ambigüedad. Esta cualidad se llama confort espacial: confort, porque se relaciona con el conjunto de requerimientos que afecta a nuestros sentidos, y espacial,

por que utiliza los recursos que ofrece la arquitectura. Se considerará, por tanto, el confort espacial en tanto que afecta a la construcción de la planta y la sección de la vivienda, y nos habla de valores relacionados con: el confort espacial y visual, la contigüidad entre los espacios; percepción simultánea o secuencial; ambigüedad o sensación de espacio; etc.

4.9.2. La habitabilidad en el edificio

El edificio constituye el primer escalón para conseguir un modelo de ciudad cohesionado. Además de las dependencias de uso comunitario ligadas a los servicios técnicos (compañías; mantenimiento; concentración energética; recogida selectiva, etc.), los edificios o la agrupación de estos deberán proporcionar espacios que complementen las actividades del hogar y que fomenten la relación vecinal. Uno de los espacios susceptibles de ser recuperados para el uso comunitario es la propia cubierta. Esta, hoy practicable para las instalaciones, es un espacio idóneo para contener desde servicios comunes (tendederos), lugares de recreo, hasta lugares de ocio relación y cubiertas verdes o mesas de cultivo.

Es objetivo del Urbanismo Ecológico facilitar la convivencia de diversos programas residenciales en un mismo edificio (viviendas familiares de varios tamaños; para colectivos específicos como jóvenes, personas mayores, etc.), y los que provienen de usos no residenciales ligados a la actividad terciaria, comercial y productiva (pequeños talleres, despachos profesionales, etc.). Esto contribuye a un modelo de ciudad no zonificada y a la proximidad entre residencia y trabajo.

Este modelo edificatorio complejo -que a menudo se da en la ciudad consolidada- se ve dificultado en las nuevas promociones, debido a la aplicación sistemática de la bonificación como elemento generador del nuevo planeamiento, a las rigideces de los parámetros urbanísticos, o la propia gestión. La sección edificatoria es el mecanismo arquitectónico a partir del cual se puede conseguir esta complejidad, en contraposición a la concepción tradicional de la sistemática repetición de las plantas del edificio. Los parámetros urbanísticos y las normas favorecerán fórmulas de cómputo de espacios independientes de las superficies, considerando volumetrías específicas y combinación de otros parámetros.

Por último, se contempla la integración en la edificación residencial de pequeños equipamientos de proximidad de carácter social o asistencial. La reserva de espacios dentro de los edificios -principalmente en las plantas bajas- destinados a pequeños equipamientos de proximidad compatibles con el uso residencial, recrea una posibilidad que la ciudad consolidada ofrece y que la concepción tradicional de planeamiento a menudo impide.

Desarrollar esta opción libera suelo, potencia la urbanidad de la edificación residencial y apuesta por el equilibrio entre residencia y dotaciones.

4.9.3. El metabolismo en la edificación

Para conseguir la habitabilidad en la edificación es necesario un flujo de recursos que en el Urbanismo Ecológico tiene tendencia a minimizarse tanto en la etapa constructiva como en la de uso. Con esta finalidad, la edificación se construirá siempre que sea posible, con materiales locales, añadiendo los flujos de materiales reciclados de la construcción. El conjunto de materiales estará exento de contaminación y cumplirá con las normas y el etiquetaje ecológico.

El edificio se concibe para uso y/o evacuación, en su caso, de aguas potables, aguas grises y aguas negras. También se planifica el edificio para encontrar la máxima autosuficiencia con energías renovables. Su diseño ha de permitir las mayores eficiencias de uso ya que arquitectónicamente han estado pensadas para hacer un uso de los sistemas pasivos naturales de control climático; sistemas que reduzcan significativamente el uso de sistemas activos de energía.

4.9.4. Indicadores de habitabilidad en la vivienda y el edificio

Sobre los condicionantes e indicadores de la vivienda y la edificación se consideran como válidos los incluidos, de manera integrada, en las certificaciones existentes sobre esta materia.

4.10. Síntesis de los indicadores de sostenibilidad urbana y su acomodación a los restrictores principales

En los siguientes cuadros se enumeran los indicadores con la descripción de los objetivos mínimos y deseables.

Se muestra, también, el grado de vinculación (fuerte o débil) de cada uno de los indicadores con los componentes de la función guía y los distintos ámbitos de la habitabilidad urbana.

Todos los indicadores tienen una vinculación mayor o menor (en el cuadro se indica el grado de vinculación usando las mayúsculas o las minúsculas) con, al menos, uno de los componentes o de la función guía o de la habitabilidad urbana.

El hecho de que la función guía y la habitabilidad estén vinculadas con todos los indicadores las habilita como restrictores principales del Urbanismo Ecológico. Se comprueba, también, que los indicadores llenan de contenido cada uno de los ejes del modelo de ciudad, pudiéndose objetivar, de manera cuantificada, los aspectos clave de la compacidad, la complejidad, la eficiencia en el uso metabólico de los recursos y la cohesión social.



Indicador	Fase	Objetivo mínimo	Objetivo deseable	Restrictores
EJE E1. Compacidad y funcionalidad				
Ámbito A1. Ocupación del suelo				
1 Densidad de viviendas	P C U	>80 viviendas/ha	>100 viviendas/ha	E Ep Ch
2 Compacidad absoluta	P C U	>5 metros; >50% superficie	>5 metros; >80% superficie	E H Ep Ch
Ámbito A2. Espacio público y habitabilidad				
3 Compacidad corregida	P C U	10-50 metros; >50% superficie	10-50 metros; >80% superficie	bd ch
4 Espacio de estancia por habitante	P C U	>10m^2/habitante	>15m^2/habitante	Ep bd ch
5 Calidad del aire	P C U	<40$\mu g/m^3$; 100% población		E Ep Ed Bd
6 Confort acústico	P C U	<65 dB(A); >60% población	<65 dB(A); >75% población	Ep ed bd ch
7 Confort térmico	P C U	>50% horas de confort; >50% superficie calles	>80% horas de confort; >50% superficie calles	Ep ed ch
8 Influencia mecánica del viento	P C U	F(velocidad viento >3,6)<5%; >75% espacio estancia	F(velocidad viento >3,6)<5%; >90% espacio estancia	Ep ed ch
9 Accesibilidad del viario	P C U	Mínimo1 acera >3m por tramo; >90% longitud calles	2 aceras >3,7m por tramo; >90% longitud calles	Ep Ch
10 Espacio viario destinado al peatón	P C U	>60% viario peatonal; >50% superficie calles	>75% viario peatonal; >50% superficie calles	Ep Ch
11 Proporción de la calle	P C U	h/d <2; >50% superficie calles	h/d <1; >50% superficie calles	E Ep bd
12 Percepción visual del volumen verde	P C U	>10% volumen verde; >50% superficie calles	>10% volumen verde; >75% superficie calles	Ep Bd
Ámbito A3. Movilidad y servicios				
13 Modo de desplazamiento de la población	U	<25% viajes por habitante y dia en vehículo privado	<15% viajes por habitante y dia en vehículo privado	E Ep Ch
14 Proximidad a redes de transporte alternativo vehículo	P C U	<300 metros a paradas TP, red ciclista y red peatonal;>80% pobl.	<300 metros a paradas TP, red ciclista y red peatonal;100% pobl.	E Ep Ch
15 Espacio viario de acceso restringido al vehículo de paso	P C U	>60% (en relación al viario total ámbito de actuación)	>75% (en relación al viario total ámbito de actuación)	E Ep Bd Ch
16 Aparcamiento de bicicletas	P C U	<100 metros; >80% población. Dotación: 2 plazas/vivienda + dotación equip + dotación uso terciario (en la propia edificación)		E Ep Ed Ch
17 Aparcamiento de vehículos fuera de calzada	P C U	1 plaza/vivienda; >80% plazas fuera de calzada	1 plaza/vivienda; >90% plazas fuera de calzada	E Ep Ed Ch
18 Cobertura de la demanda de aparcamiento de vehículos	U	<25% de déficit infraestructural de plazas (fuera de calzada)	<10% de déficit infraestructural de plazas (fuera de calzada)	h Ep Ed
19 Reserva de espacio para la distribución de mercancías	P C	Reserva de espacio (fuera de calzada) para plataforma logística (dimensionado variable).		E Ep Ed
20 Reserva de espacio para infraestructuras de servicios	P C	Reserva de espacio (subsuelo) para galerías de servicios		E Ep Ed
EJE E2. Complejidad				
Ámbito A4. Complejidad urbana				
21 Diversidad urbana	P C U	>4,5 bits de información; (valor medio en áreas<50ha)	>5 bits de información; (valor medio en áreas<50ha)	e H Ep Eq Ed Ch
22 Equilibrio entre la actividad y residencia	P C U	>20m^2t actividad (uso terciario/ productivo)/vivienda (o superficie construída total)		H ep Ed Ch
23 Proximidad a actividades comerciales de uso cotidiano	U	6 (de 8) actividades distintas; >75% población	Todas las actividades; 100% población	E H Ep Ed Ch
24 Actividades/equipamientos @	U	>10m^2t/techo total no residencial; >50% superficie	>15m^2t/techo total no residencial; >50% superficie	H Ep Eq Ed Ch
25 Continuidad espacial y funcional de la calle	P C U	Interacción alta/muy alta; >25% longitud calles	Interacción alta/muy alta; >50% longitud calles	H Ep Ed Ch
Ámbito A5. Espacios verdes y biodiversidad				
26 Permeabilidad del suelo	P C U	>20%. En ámbitos >50ha: cumplimiento en >50% superficie		Ep Bd
27 Espacio verde por habitante	P C U	>10m^2/habitante	>15m^2/habitante	Ep Bd Ch
28 Proximidad simultánea a espacios verdes	P C U	3 (de 4) espacios verdes; 100% población	Todas los espacios verdes; 100% población	Ep Bd Ch
29 Densidad de árboles por tramo de calle	P C U	0,2 árboles/metro; >50% longitud calles	0,2 árboles/metro; >75% longitud calles	Ep Bd
30 Cubiertas verdes	P C	>10% superficie en cubierta disponible		E Ep Eq Ed Bd

Fig. 4. Indicadores de sostenibilidad urbana.

Indicador	Fase	Objetivo mínimo	Objetivo deseable	Restrictores
EJE E3. Eficiencia				
Ámbito A6. Metabolismo urbano				
31 Demanda energética: residencia	P C U	<80 kWh/m²	<65 kWh/m²	E eq ed ch
32 Demanda energética: servicios y equipamientos	P C U	<225 kWh/m² (servicios) + <110 kWh/m² (equipamientos)	<190 kWh/m² (servicios) + <90 kWh/m² (equipamientos)	E eq ed ch
33 Demanda energética: espacio público	P C U	Variable según tipología espacio público. P.ej. Espacio estancia: <0,6 kWh/m² (luz HM)		E ep ch
34 Producción local de energías renovables	P C U	>20 kWh/m² superficie ámbito	>40 kWh/m² superficie ámbito	E eq ed
35 Consumo energético	P C U	<100 kWh/m² superficie construida del ámbito	<80 kWh/m² superficie construida del ámbito	E ep eq ed ch
36 Emisiones de CO_2 equivalente	P C U	<30 kg CO_2/m² superficie construida del ámbito	<20 kg CO_2/m² superficie construida del ámbito	E ep eq ed bd
37 Autoproducción energética	P C U	>30% (mediante energías renovables)	>50% (mediante energías renovables)	E ep eq ed ch
38 Demanda hídrica (por calidades y total)	P C U	<100 litros por persona y día (lpd) agua potable	<70 lpd agua potable; <105 lpd demanda total)	E ep eq ed ch
39 Suficiencia hídrica de la demanda de agua no potable	P C U	100% (mediante captación pluviales, aguas grises regeneradas, agua freática, etc.)		E ep eq ed
40 Recogida selectiva neta	U	Variable según la fracción: materia organica (55-80%), papel y cartón (75-80%), vidrio (75-90%), envases (50-60%), metal (50-60%), etc.		E ep ed bd
41 Proximidad a puntos de recogida de residuos	P C U	<150 metros; >80% población	<150 metros; 100% población	E ep ed
42 Proximidad a punto limpio	P C U	<600 metros; >80% población	<600 metros; 100% población	E eq ed ch
43 Cierre del ciclo de la materia organica (MO)	P C U	>25% MO. Transformación en compost para uso local	>50% MO. Transformación en compost para uso local	E ep ed bd ch
44 Producción local de alimentos básicos	P C U	>10% por grupo alimentos; >25% viviendas con huerto com.	Variable según potencial; >50% viviendas con huerto com.	E ep bd ch
EJE E4. Cohesión social				
Ámbito A7. Cohesión social				
45 Envejecimiento de la población	U	<200% índice envejecimiento; <30% índice segregación	± 100% índice envejecimiento; <10% índice segregación	ep eq ed Ch
46 Población de nacionalidad extrangera	U	<30% índice segregación	<10% índice segregación	ep Ch
47 Titulados superiores	U	<30% índice segregación	<10% índice segregación	Ch
48 Dotación vivienda protegida	P C U	>40%	Variable según contexto	Eq Ed Ch
49 Dotación equipamientos básicos	P C U	>75% dotación optima referencial (por tipologia)	100% dotación optima referencial (por tipología)	ep Eq Ch
50 Proximidad simultánea a equipamientos básicos	P C U	4 (de 5) tipologías; 100 población	5 (de 5) tipologías; 100 población	ep Eq Ch
Habitabilidad en la vivienda y el edificio				
Viviendas y edificios más sostenibles	C U	Cumplimiento de los requisitos incluidos en las certificaciones existentes (internacionales/nacionales) sobre esta materia.		E H Ed Ch
Función guía de la sostenibilidad				
EFICIENCIA DEL SISTEMA URBANO (E/nH)	U	<40	<20	E H Ep Eq Ed Ch

LEYENDA

FASE
- P Planeamiento
- C Construcción/Urbanización
- U Uso - modelo de ocupación -

RESTRICTORES
- E Energía: consumo de recursos
- H Complejidad: información organizada
- Ep Espacio público
- Eq Equipamientos
- Ed Edificación
- Bd Biodiversidad
- Ch Cohesión social

Fig.5. Indicadores de sostenibilidad urbana.

5. Instrumentos de ordenación del Urbanismo Ecológico

5.1. Los tres niveles del Urbanismo Ecológico

El urbanismo actual, que tiene la concreción formal en un plano de dos dimensiones a cota cero, viene limitado por el propio instrumento proyectual. En el plano urbanístico no cabe, prácticamente, nada más. Las variables antes mencionadas no tienen cabida y por eso no se resuelven en la ecuación urbana. Seguramente, el que no quepan, tiene su raíz en que no están presentes en el acervo conceptual de una parte de los urbanistas.

El Urbanismo Ecológico [9] es el urbanismo que proyecta no uno sino tres planos con el mismo detalle y a la misma escala que los urbanistas actuales proyectan el plan urbanístico en superficie. Proyectar un plano en altura y un plano del subsuelo, aparte del plano en superficie, permite que el conjunto de variables que atienden a los retos actuales puedan ser plasmadas de una manera o de otra.

Tres planos a escala urbanística (no a escala arquitectónica y/o proyectual), proyectados en horizontal y luego engarzados en vertical deben proporcionar la carcasa de los modelos urbanos anunciados.

Tenemos, pues, tres planos que dan lugar al urbanismo en altura, al urbanismo en superficie, y al urbanismo subterráneo. El desarrollo de estos proporcionará, como lo hizo el urbanismo ortodoxo, un conjunto de instrumentos de carácter legal, económicos y organizativos acomodados a un nuevo statu quo y a la resolución de los nuevos retos.

Aparte de la concreción formal del Urbanismo Ecológico, con la realización de los tres planos, el nuevo urbanismo se centra en la resolución de las variables ligadas a los nuevos retos antes mencionados, sin olvidar los planteados y en parte resueltos con los instrumentos actuales.

Los objetivos principales a resolver formalmente por el Urbanismo Ecológico son los siguientes:

5.1.1. En el ámbito de la biodiversidad y la preservación de valores geográficos y naturales

- El Urbanismo Ecológico en altura permite la creación de una capa de biodiversidad que se añade a la capa en superficie, restituyendo, en parte, la capacidad biológica que la urbanización le ha arrebatado. La definición de dos niveles de verde urbano, uno en altura y otro en superficie, conectados con árboles de gran porte, enredaderas, etc., modifica la concepción actual de la biodiversidad urbana, pudiéndose conectar con otros programas interesantes como la creación de paisajes sonoros ligados a la avifauna insectívora (canora), a programas de autocompostaje de la materia orgánica residual doméstica o proporcionar beneficios energéticos derivados de la inercia térmica de las cubiertas verdes.
- El Urbanismo Ecológico subterráneo incluye el suelo estructural para obtener la habitabilidad adecuada para la vegetación fundamentalmente arbórea.
- La planificación urbanística debería incluir, entre los Planes especiales, uno dedicado a la definición del verde urbano.
- El Urbanismo Ecológico se acomoda desde el mismo diseño, a las condiciones naturales del lugar, ya que se trata de aprovechar al máximo lo que la naturaleza ofrece, sea sol, lluvia, una capa de agua subterránea o la condición de un sustrato rocoso. El nuevo urbanismo obliga a respetar las peculiaridades geográficas del territorio para preservar los valores naturales existentes, y la capacidad de carga del territorio.

5.1.2. En el ámbito del metabolismo urbano

- El nuevo urbanismo integra los flujos metabólicos minimizando su consumo y su impacto tanto en la edificación como en el espacio público.
- La gestión de la demanda. La captación y almacenamiento del agua de lluvia, o también del acuífero, tanto en altura como en el subsuelo, combinado con tecnología y técnicas de gestión de ahorro y reutilización nos acercan a la idea de autosuficiencia para un bien escaso como es el agua.
- La gestión de la demanda energética y la captación de energías renovables: solar, eólica, geotérmica, etc., el almacenamiento (en el subsuelo, por ejemplo, con depósitos estacionales) y los dispositivos e instalaciones que actúan como sistemas pasivos para el ahorro y la eficiencia energética: aljibes de agua en altura, cubiertas verdes, etc., y que vienen derivados de otros sectores (agua, biodiversidad, etc.) o del mismo ámbito de la arquitectura bioclimática, nos acercan a la autosuficiencia energética.
- La autosuficiencia de materiales y su reciclaje, potenciando el uso de materiales locales y la jerarquía en la gestión de residuos llamada de las 3R (reducir, reutilizar, reciclar) ya sea en el proceso urbanizador, en el posterior funcionamiento del área urbana o también en la deconstrucción de esta, cuando haya terminado su vida útil.

5.1.3. En el ámbito de los servicios y la logística urbana

- Se ordenan los servicios de agua, gas, electricidad y telecomunicaciones en galerías.
- Se ordena la distribución urbana a través de plataformas logísticas liberando de ésta al espacio público y reduciendo las fricciones actuales que las dobles y triples filas comporten.
- El tamaño de las plataformas está en función de la masa crítica para asegurar su rentabilidad y eso está íntimamente relacionado con la densidad de actividades. En el Eixample de Barcelona, un área de 9 manzanas (400 x 400 m) es más que suficiente para albergar una plataforma logística. Lo interesante de estas instalaciones es que caben en espacios pequeños a compartir con aparcamientos subterráneos y dan la libertad para distribuir en horario nocturno (con vehículos y maquinaria eléctrica silenciosa) sin

Fuente: Rueda, S y Echave, C (2007)

Fig. 6.

interrumpir el funcionamiento del espacio público durante el día.

Con la tecnología actual y sobre todo la futura, se debería ir pensando en combinar las galerías de servicios con el transporte de paquetería con robots móviles.

5.1.4. En el ámbito de la movilidad y la funcionalidad

- Establecer redes propias para cada medio de transporte, fomentando las redes de transporte masivo público en el subsuelo y en superficie.
- Para el ordenamiento de las redes de movilidad se propone la creación de una nueva célula urbana (≈ 400 x 400 m), llamada Supermanzana. Esto permite reducir las infraestructuras de movilidad en vehículo privado a las mínimas imprescindibles sin que se ponga en riesgo la funcionalidad y la organización urbana.
- Reducir a la mínima expresión el aparcamiento en superficie (en el espacio público).

5.1.5. En el ámbito del espacio público

- Multiplicar los usos y funciones del espacio público en superficie, a fin de que el ciudadano ocupe "toda" la ciudad y pase de la categoría de peatón a ciudadano, liberando la mayor parte del espacio público, hoy destinado a la circulación y al aparcamiento del vehículo privado[7]. Con el desarrollo de supermanzanas se pueden liberar superficies de espacio público por encima del 75%.
- Incorporar una nueva dimensión de espacio público en altura y en el subsuelo.
- Incorporar en el diseño del espacio público el conjunto de variables del entorno: confort térmico, luz y sombras, canalización del aire, paisaje de colores o de sonidos.

El espacio público es el receptor del conjunto de actividades urbanas, en él cristalizan las características de la ciudad y en buena medida la definen. La interacción de los elementos urbanos dan lugar a un determinado paisaje

[7] Con una distribución del uso del espacio público diferente al actual (garantizando en cualquier caso la funcionalidad urbana), un 30% máximo para el vehículo privado y un 70% para el resto de usos, se consigue que el conjunto de indicadores de sostenibilidad y calidad urbana se vean favorecidos de manera significativa.

visual y sonoro, a un marco de intercambio y de convivencia, a un conjunto de usos y funciones, etc.

En los sistemas naturales la interacción entre sus componentes da lugar a una regulación de las variables de entorno: luz, temperatura, humedad relativa, caminos, etc. En la ciudad, un control similar lo encontramos en el interior de los edificios, donde los arquitectos con su diseño controlan las variables de confort. No ocurre lo mismo en el espacio público. El nuevo urbanismo se propone controlar las variables de entorno: confort térmico, ruido, contaminación atmosférica, seguridad, accesibilidad, etc. desde la planificación[8] .

5.1.6. *En el ámbito de la complejidad urbana y la sociedad del conocimiento*

- El Urbanismo Ecológico se acomoda al modelo de ciudad mediterránea, compacta, compleja, eficiente y cohesionada socialmente ya que condiciona y hace factible la proximidad entre usos y funciones al mismo tiempo que potencia intencionadamente la mixticidad de estos, multiplicando la complejidad organizativa. Se busca ampliar las áreas de centralidad, creando nuevas áreas centrales que aumenten la información organizada del conjunto.
- El Urbanismo Ecológico sitúa las actividades en los tres planos, privilegiando en superficie las actividades más atractivas y evitando situar en superficie aquellas que generan "desiertos" urbanos.
- Las mezclas adecuadas de actividad diversa y residencia permiten aumentar la complejidad organizativa ya que potencia la proliferación de actividades de proximidad ligadas a la residencia y, además, incrementa los índices de autocontención y autosuficiencia en el empleo (proximidad de la residencia al trabajo).
- La sociedad de la información y el conocimiento se articula fundamentalmente a través de la complejidad urbana, es decir, en las personas jurídicas que atesoran el conocimiento que se amplifica en la medida que lo hace la complejidad de la red, que para cada ámbito manifiesta una determinada masa crítica. El aumento de la complejidad atrae a nuevas personas físicas y jurídicas con conocimiento que, a su vez, aumentan la diversidad y la densidad de conocimientos diferentes. Después, las piezas estructurales: edificios, redes, servicios, espacio público, etc. y funcionales, de la mano de las tecnologías de la información y la comunicación se acoplan y potencian el intercambio de información y conocimiento.
- Los flujos de información, como los metabólicos deben integrarse, también, en la concepción de las diferentes piezas urbanas y en su desarrollo. Empezando por la compatibilidad de los usos y funciones que proporcionan una mayor mixticidad urbana, se debería continuar con la aplicación de la información (diseño, tecnología, arte, etc.), como valor añadido, en cada uno de los elementos urbanos: edificios, espacio público y mobiliario urbano, transporte, etc., para hacer compatibles la complejidad, la competitividad y una mayor calidad urbana y de vida.

[8] La Agencia de Ecología Urbana de Barcelona ha desarrollado la metodología para el cálculo de un indicador sintético que se aproxima a la idea de calidad del espacio público.

5.2. La manzana y la supermanzana

El Urbanismo Ecológico requiere unidades básicas de organización para poder cuantificar y ordenar los procesos y condicionantes de la nueva concepción del urbanismo de los tres niveles. Estas células básicas representan un marco nuevo regulador, más amplio y complejo que las actuales normas urbanísticas derivadas del planeamiento vigente, pero a la vez más flexible y adaptable a las necesidades de las ciudades más sostenibles. Estas unidades de ordenación son la manzana y la Supermanzana.

Para cada uno de los niveles o estratos de ordenación (subterráneo, superficie y altura) se establecen nuevos parámetros clásicos de ordenación y se sustituyen por otros parámetros en forma de fichas características de manzana.

Las fichas características permiten un planeamiento abierto más flexible, para dar cabida a los nuevos modelos ligados a la vivienda y a la edificación, y también fijan los parámetros y reservas para atender a los nuevos modelos de movilidad y espacio publico, metabolismo urbano y cohesión social.

Por ejemplo, el nuevo urbanismo especifica la ocupación de las cubiertas para cada captador de energía, captador de agua o estratos vegetales. Especifica las reservas de espacio para aparcamiento de bicicletas, depósitos acumuladores estacionales para la transferencia de energía solar térmica o salas de almacenamiento para las fracciones de recogida selectiva. En relación a los parámetros urbanísticos dimensionales, el techo edificable o el número máximo de plantas, se define mediante volumetría específica o flexible.

5.2.1. *La manzana*

La manzana constituye la célula básica para la organización del espacio construido y de los espacios libres intersticiales de este, en los tres niveles de ordenación.

La manzana representa la unidad mínima para la determinación de las especificaciones urbanísticas del nuevo Urbanismo Ecológico. Estas especificaciones se fijan en las fichas características.

5.2.2. *La supermanzana*

La ciudad es, en esencia, la reunión de complementarios. Es la reunión de usos y funciones distintas que trabajan sinérgicamente manteniendo la organización urbana de manera dinámica. En la ciudad mediterránea, el lugar de reunión y el lugar de encuentro es el espacio público. Es el lugar simbólico en que ciudad, democracia y política se encuentran. La ciudad, la democracia, la política y la filosofía nacieron juntas en la antigua Grecia con la

irrupción de las leyes disociativas del logos y de la superación del organicismo de la vida preurbana que otorgaba a cada cual un destino marcado por la irrebatible naturaleza.

El espacio público marca los límites de la idea de ciudad. Donde no lo hay puede hablarse de urbanización pero difícilmente de ciudad.

Antes, en el espacio público los usos y las funciones urbanas se multiplicaban: el juego, la fiesta, la estancia, el intercambio comercial, la movilidad a pie o a tracción animal, etc. se recreaban cotidianamente llenando de sentido la ciudad y otorgando al ciudadano su carta de naturaleza.

Si el espacio público es, en esencia, la ciudad, un ciudadano lo es enteramente cuando ocupa “sin límites” el espacio público. Si uno recuerda las imágenes de los hermanos Lumière, se aprecia cómo las calles de París a principios del siglo XX eran un caos de personas, caballerías y carruajes. Parecían que iban a colisionar unos con otros con movimientos azarosos de alta velocidad provocados por la tecnología de filmación de aquella época. Pero todo discurría con armonía ocupando (y eso es lo esencial) “todo” el espacio público. Luego, con la aparición del automóvil y con él la posibilidad de cubrir espacios en un menor periodo de tiempo, se divide el espacio público asignándole, normalmente, el centro de la calle a los vehículos y unas cintas pegadas a la edificación a los “peatones”. Desde ese instante el que habita la ciudad se convierte en peatón (un modo de transporte) y deja de ser ciudadano. Desde ese momento, el vehículo se enseñorea y se hace dueño del espacio público, de manera paulatina al principio, explosiva hoy.

Actualmente, las ciudades españolas dedican más del 60% de su espacio público (directa o indirectamente) al automóvil, sometiéndolo a unas condiciones de entorno inadmisibles. La congestión, el ruido, la contaminación atmosférica, los accidentes de tráfico o a la intrusión visual son, entre otras, variables que ven superados los límites y que merman la calidad urbana y el espacio dedicado al peatón y al resto de modos de transporte. El vehículo privado condiciona, a su vez, el resto de usos y funciones del espacio público.

5.2.3. La creación de una nueva célula urbana

Morfológicamente, la ciudad se ha ido creando y todavía hoy se crea, con manzanas que constituyen la célula básica de los sistemas urbanos. La manzana se adapta perfectamente a los movimientos a pie y permite que los frentes de fachada se multipliquen y con ellos el número de actividades diversas. Los espacios intersticiales entre manzanas constituyen el grueso del espacio público, un espacio que interactúa con las actividades en planta baja que forman parte de una suerte de ampliación del espacio público que como si fuera la sístole y la diástole de un corazón, capta del flujo callejero y suelta al mismo flujo un número determinado de ciudadanos de forma dinámica.

El tamaño de la manzana permite ubicar un número elevado de actividades a pie de calle que no se tendrían con tamaños, por ejemplo, mayores. Actúa como las estructuras vivas que se repliegan sobre sí mismas para ofrecer mayor superficie de captación, como es el caso del intestino delgado.

La ciudad cobra sentido cuando posee la mayor diversidad de usos posible (reunión de complementarios) y un espacio público con todas sus funciones.

Como decíamos, así fue hasta la aparición del vehículo a motor. Con su llegada, la ciudad se resiente, siendo la ocupación masiva de vehículos y sus consecuencias el factor que mayores disfunciones crea en la ciudad.

La manzana tiene de lado un tamaño que se acomoda, como se dice más arriba, a los viajes a pie. De hecho, en un itinerario se puede cambiar de dirección a derecha o izquierda o incluso seguir la misma dirección cada 80, 90 ó 100 metros, es decir, en cada cruce de manzana. Esta realidad física tiene un efecto psicológico positivo que permite escoger itinerarios diversos para llegar a un mismo destino. No ocurriría lo mismo si en lugar de 100 metros las manzanas tuvieran, pongamos por caso, 2 kilómetros. Los viajes a pie se reducirían drásticamente como también lo haría el número de actividades en el frente de fachada. El paisaje urbano se empobrece y, con él, los incentivos para el movimiento a pie.

Uno de los mayores errores cometidos con la aparición del coche es darle libertad de paso por todos los tramos de calle de la ciudad conformada, como si fuera un móvil con las mismas características de los ya existentes. ¡Un error mayúsculo! El nuevo artefacto nacía con el objetivo de ir de un punto a otro de la ciudad a la mayor velocidad posible. Al permitirle el paso por todos los tramos de calle, su objetivo “chocaba” con otros coches que tenían el mismo objetivo pero en direcciones cruzadas en cada manzana.

El objetivo y la trama no casan. No tiene mucho sentido crear un móvil para que corra velozmente y tenga una probabilidad elevada de tenerse que parar cada 100 metros.

Cuando se han creado infraestructuras para el coche, se han construido autopistas que están diseñadas para que no haya nada que interrumpa el flujo de tráfico, incluso las entradas y las salidas están pensadas para que no se resienta, o lo haga lo mas mínimo posible, la velocidad del flujo troncal.

Construir autopistas urbanas también se considera un error pues, aparte de cumplir el objetivo para las que fueron creadas, generan un impacto de tal magnitud que muchas de las ciudades que las construyeron en su momento, hoy las han desmantelado o se lamentan de haberlas construido. El impacto de la “sopraelevata” que transcurre por el frente litoral de Genova, por ejemplo, lo sufren y lo maldicen los genoveses diariamente.

Si el derecho de paso por todos los tramos de calle es un error y las autopistas también, debemos preguntarnos: ¿cuál es la estructura urbana que mejor se acomoda al objetivo del coche, minimizando el impacto generado? La solución a esta ecuación es, a mi entender, la creación de una nueva célula básica urbana que se acomode a las características de la ciudad y a las del automóvil. Una célula de aproximadamente 400 x 400 m que en su interior acoja

varias manzanas podría resolver muchas de las disfunciones que hoy padece la ciudad, garantizando, a su vez, la funcionalidad y la organización del sistema.

Con 400 metros de lado, la onda verde semafórica se hace más eficiente, como también es más eficiente la red de vías básicas que conformarían una suerte de supermanzanas en una especie de malla "ortogonal", sabiendo que las redes ortogonales son, en los sistemas urbanos, las más eficientes. Con una célula de 400 metros de lado se reduce significativamente el número de giros a izquierda y derecha, pudiendo girar solamente cada 400 metros. Los giros son, junto con los semáforos, los factores que mas influyen en la perdida de velocidad. En una red de vías básicas, con flujos superiores a los 15.000 vehículos/día, las dobles filas se reducen a su mínima expresión. Por otra parte, un vehículo motorizado alcanza una velocidad media en ciudad, al menos 4 veces superior a la velocidad del que va a pie. Ello supone que la flexibilidad de la supermanzana para el coche es, cuando menos, similar si no superior a la manzana para el que va a pie.

A la estructura de manzanas que hasta hoy ha conformado la morfología urbana, le superpondríamos una nueva estructura -supermanzanas-, para la monitorización, integrada por una red de vías básicas que crearía unos polígonos con varias manzanas en su interior. Las vías básicas se destinarían a la circulación del vehículo de paso y al transporte público de superficie (en algunos casos también al sistema principal de carriles bicicleta).

Al asignar unas vías urbanas pensadas para el vehículo de paso y restringir su circulación por el interior de las supermanzanas conseguimos, garantizando la funcionalidad del sistema, la liberalización del 60 ó el 70% del espacio público hoy destinado a la motorización. El objetivo del vehículo de paso, es decir, ir de un punto a otro de la ciudad a la mayor velocidad posible, es incompatible con el resto de usos y funciones que se dan cita en el espacio público: el juego, la fiesta, el intercambio, la estancia, etc. Cuando al vehículo de paso se le da derecho a circular por un determinado lugar, no hay derecho urbano que lo supere.

El transporte colectivo de superficie: autobús, taxis, tranvías, etc. circula por las vías básicas puesto que están pensadas para que la velocidad en ellas sea la más elevada posible en trama urbana. Hacer circular el transporte público por vías secundarias sería penalizarlo. Además, con una estructura semafórica cada 400 metros, es posible pensar en implantar un sistema de priorización semafórica para el transporte público.

El aparcamiento vinculado a las vías básicas y fuera de calzada permite que cualquier usuario del coche pueda dejar su vehículo a una distancia al destino, similar a la distancia que tiene un ciudadano desde la parada del autobús, siempre menor a los 300 metros a pie. Aunque la idea es restringir la circulación del vehículo de paso en el interior de las supermanzanas, el sistema de "puertas" se puede ajustar para dar cabida flexible a cualquier eventualidad.

En el interior de las supermanzanas se dan cita todas las funciones potenciales del espacio público y, además, circulan el vehículo del residente, la carga y descarga en ventanas temporales establecidas, las emergencias, los servicios, etc., es decir, en el espacio público de las intervías funciona todo exactamente igual que en la actualidad a excepción de la circulación del vehículo de paso cuyo objetivo es incompatible con el resto de usos y funciones. Sin la circulación del vehículo de paso el resto de usuarios del espacio público pueden hacer compatibles sus objetivos.

La sección de las calles en las supermanzanas puede ser en plataforma única, lo que permite asegurar la accesibilidad de todos, no importa las características de la trama: de ensanche, de centro histórico, etc. El aparcamiento en superficie se va reduciendo en la medida que están a punto los aparcamientos fuera de calzada que deberán dar cabida a los residentes y en las vías básicas a los foráneos con plazas de rotación.




Fig. 7. Supermanzanas.

Con plataforma única la velocidad de cualquier móvil se acomoda a la velocidad del peatón, lo que supone que la accesibilidad para las personas con dificultades físicas se garantice en prácticamente la ciudad entera. Para este colectivo, salir a la calle se concreta, en muchas ocasiones, en una "carrera de obstáculos" que pone de manifiesto el nivel de calidad urbana. El minusválido juega un papel indicador de calidad del espacio público de primer orden, similar al que juega (salvando las distancias y dicho metafóricamente) la nutria en un río u otros organismos en los ecosistemas acuáticos indicadores de su grado de conservación y calidad. Donde viven nutrias, el río manifiesta una calidad excelente. Si la persona con dificultades físicas puede pasar haciendo uso de la continuidad del movimiento, sin barreras, se puede afirmar que el espacio cumple, como mínimo, la condición necesaria de calidad y se habrá de ver si suficiente en cada caso.

Las supermanzanas son espacios cuya velocidad se restringe a 10 km/h. Son "áreas 10", que sustituyen a las "áreas 30" que, como se ha podido comprobar en la práctica, no resuelven prácticamente ninguna disfunción urbana.

La supermanzana constituye la célula básica para la organización de las redes de movilidad y del espacio público de las redes de infraestructuras y de servicios, de la estructura de la red verde, de la red de equipamientos y servicios básicos y de las relaciones de vecindad y comunicación con el entorno en los tres niveles de ordenación.

6. La gestión y la gobernanza

Cada objetivo requiere de una organización adecuada para alcanzarlo. La técnica y las tecnologías actuales son suficientes para reducir las incertidumbres que se derivan del proceso insostenible en el que estamos inmersos. Sin embargo, al no disponer de una organización, no tenemos los mecanismos de gestión adecuados para reducir dichas incertidumbres. La insostenibilidad hoy se debe, más que a la falta de conocimiento, a la falta de organización y gestión adecuadas para revertir la dirección del proceso hacia la sostenibilidad.

El Urbanismo Ecológico incorpora, en relación al urbanismo actual, nuevos objetivos que obligan a repensar los mecanismos de gestión para alcanzarlos. La realidad demuestra que las empresas eléctricas y los promotores, por ejemplo, no tienen entre sus objetivos hacer autosuficientes los nuevos desarrollos urbanos con energías renovables. Si el uso de las mismas es un objetivo del Urbanismo Ecológico, necesitaremos buscar la organización adecuada para su gestión. Este ejemplo lo podemos aplicar a cualquiera de los aspectos implicados en los nuevos desarrollos planificados con criterios de sostenibilidad, y también en los tejidos existentes en proceso de rehabilitación y/o regeneración.

Hoy los servicios suelen tener una estructura centralizada donde priman la previsión del servicio y los ingresos económicos fruto de dicha prestación. No entran en la ecuación ni la gestión de la demanda, ni el origen y características del recurso, ni el rol de los usuarios… lo que impide abordar los objetivos relacionados con la sostenibilidad.

Como se ha podido comprobar, hoy, la mayoría de municipios españoles tienen dificultades para desarrollar los programas comprometidos, mantener los servicios y equipamientos, e incluso mantener las plantillas laborales. La razón no es otra que el derrumbe del sector de la construcción y, con ello, los ingresos ligados al proceso urbanizador. Para el mantenimiento de los servicios que proporciona la administración local se impone un cambio de rumbo que garantice los ingresos necesarios para la prestación de dichos servicios. Para ello, es necesario un cambio profundo de la organización municipal que se acomode a nuevos escenarios. Uno de ellos, el que podría suponer un avance significativo en los procesos hacia la sostenibilidad y, a la vez, un incremento de ingresos substancial para las arcas municipales es el que dimana de la aplicación del Urbanismo Ecológico. La asunción, por parte del ayuntamiento, de la provisión de todos los servicios metabólicos de manera centralizada, la gestión de las galerías de servicios, de los centros de distribución urbana, de los alquileres de viviendas en régimen de protección y de locales, de los aparcamientos, etc. supondría, a la larga, la creación de la "empresa" de servicios más importante del municipio. Hoy lo detentan las entidades financieras a través de empresas especializadas de aguas, de energía, etc. Con la aplicación de los criterios de Urbanismo Ecológico, la prestación de servicios urbanos contaría con las premisas de sostenibilidad que no incorporan las empresas actualmente por ser extrañas a su lógica de negocio.

Por otra parte, para fomentar la transparencia administrativa, la formación y la participación de la ciudadanía en el planeamiento, es necesario articular las organizaciones adecuadas para pilotar los procesos de gobernanza y de gestión. Sería conveniente, que esta o estas organizaciones estuvieran tuteladas por la administración (muchos de los servicios que se van a prestar son públicos) y que fueran flexibles, es decir, que se pudieran acomodar a cada una de las etapas del proceso urbanístico: planificación, construcción y uso.

7. Conclusiones

El urbanismo ecológico propone construir "ciudad" en lugar de "urbanización". Una ciudad que atienda de manera intencionada los criterios de la sostenibilidad en la era de la información. Para ello se arma con un marco conceptual e instrumental que permita planificar nuevos desarrollos urbanos y también la renovación de los existentes, atendiendo a los criterios citados.

El conjunto de indicadores propuestos se convierten en una vara de medir de la sostenibilidad urbana teniendo como referente el modelo urbano de la ciudad compacta, compleja, eficiente y cohesionada socialmente. Esta vara de

medir se convierte, a su vez, en un sistema de evaluación similar a los conocidos: Leed, Breeam, Casbee, etc., pero, en nuestro caso, acomodado a nuestra realidad urbana y, sobre todo, a un modelo urbano de referencia, cuestión ésta que no se da en el resto de certificados de urbanismo con criterios de sostenibilidad.

El Urbanismo Ecológico propone dibujar tres planos (en altura, superficie y subsuelo) con el fin de incorporar en la propuesta de planificación, el conjunto de variables de la sostenibilidad (con un sólo plano, como en la actualidad, éstas no caben).

Para el cumplimiento de los objetivos del Urbanismo Ecológico, es necesario modificar el marco de gestión, normativo y en parte económico, sobre todo, de la administración local.

Glosario

Certificación: acción de acreditar que un determinado proceso cumple los requisitos o exigencias definidos por una norma o especificidad técnica.
Conurbación: área urbana formada por núcleos que en principio eran independientes y con el crecimiento se han unido.
Desmaterialización: sustitución de procesos que requieren gasto físico de materiales por otros que no lo requieren.
Ecosistema: sistema natural formado por un conjunto de organismos vivos y el medio físico donde se relacionan.
Eficiencia: uso racional de los recursos que constituyen el soporte de cualquier sistema urbano (flujos de materiales, agua, energía y calidad del aire), para mantener su organización y evitar ser contaminado.
Energía exosomática: energía generada fuera del cuerpo humano.
Entropía: grado de desorden de un sistema.
Estabilidad del sistema: capacidad de un sistema para recobrar una condición perdida debido a una perturbación.
Gobernanza: proceso de coordinación de actores, de grupos sociales y de instituciones con el objetivo de lograr metas definidas colectivamente.
Habitabilidad urbana: capacidad de los espacios urbanos para satisfacer las necesidades de sus habitantes.
Información organizada: conjunto de datos organizados, en bits de información, que determina la complejidad de un sistema.
Isla de calor: acumulación de calor en los sistemas urbanos debida a la absorción del calor de los materiales de construcción.
Organización urbana: procesos generados por el conjunto de elementos urbanos organizados que forman un sistema urbano.
Resiliencia: capacidad de anticiparse un riesgo para recuperarse rápidamente del impacto causado, evolucionando y/o fortaleciéndose. Es decir, es la capacidad de las comunidades, sociedades o sistemas expuestos a amenazas, para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse.
Sistema: conjunto de elementos físico-químicos que interaccionan.
Sistema de Indicadores: herramienta que permite, mediante un conjunto de variables, sintetizar en valores numéricos muchos de los aspectos que determinan el grado de sostenibilidad de una ciudad, tomando como referencia un modelo urbano más sostenible.
Sistemas Urbanos: conjuntos de elementos que interaccionan entre sí y que forman una ciudad, otorgando a cada elemento una posición en el sistema.
Urbanismo Ecológico: el urbanismo adquiere el calificativo de ecológico cuando pasa por el tamiz de un conjunto de restricciones (condicionantes e indicadores) que parametrizan el grado de acomodación de un determinado planeamiento o tejido consolidado a un modelo intencionado de ciudad más sostenible en la era de la información.

Bibliografía

[1] S. Rueda. El Urbanismo Ecológico. Il trasversale gioco dei saperi nel progetto e nella promozione della città en TRIA, Rivista Internazionale di cultura urbanistica, Núm. 06. Università degli Studi di Napoli Federico II. Centro Interdipartimentale di Ricerca, Laboratorio di Urbanistica e Pianificazione Territoriale. Edizioni Scientifiche Italiane, 2011.
[2] S. Rueda. Ecología Urbana, Editorial Beta, 1995.
[3] J. Ramoneda. “A favor del espacio público”, El País, 2003.
[4] S. Rueda et al, Plan de Movilidad y Espacio Público de Vitoria-Gasteiz, 2007.
[5] A. Cuchí, S. Rueda. Libro Verde de Medio Ambiente Urbano, Ed. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2008.
[6] Decreto 55/2009, de 7 de abril, sobre las condiciones de habitabilidad de las viviendas y la cédula de habitabilidad en Cataluña.
[7] S. Rueda. Barcelona, ciutat mediterrània, compacta i complexa. Una visió de futur més sostenible, Ed. Ayuntamiento de Barcelona, 2002.
[8] S. Rueda, B. Cormenzana. Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla, 2008.
[9] S. Rueda. Un nuevo urbanismo para una ciudad más sostenible. Conferencia Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla, marzo 2006.



Agradecimientos

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE LA UPV/EHU
GOBIERNO VASCO
DEPARTAMENTO DE VIVIENDA, OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTE
AYUNTAMIENTO DE SAN SEBASTIÁN
FUNDACIÓN CRISTINA-ENEA
IGNACIO DE LA PUERTA
SONIA SAMANIEGO
PILAR GARRIDO
VICTORIA IGLESIAS
JOSÉ MARÍA HERNÁNDEZ
RAFAEL SERRA
GABRIEL VALÍN
OIER BEREZIARTUA
ALBERTO ZULUETA
EDUARDO ARTAMENDI
LAUREN ETXEPARE
MILA AIZPURUA
ALAITZ ZUBIZARRETA
ANA REBOREDO













© SERVICIO EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO I EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEKO ARGITALPEN ZERBITZUA

I. S. B. N. 978-84-9860-688-1

www.masterconstruccionsostenible.org









